

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет інформатики та обчислювальної техніки

Кафедра технічної кібернетики

«На правах рукопису»
УДК 004.043

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри
_____ І.Р. Пархомей
(підпис)

“ ____ ” _____ 2019 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології»

на тему: Підвищення швидкості системи керування платформою робота

Виконав: студент другого курсу, групи ІК-71мн
(шифр групи)

_____ Сопільняк Данил Олегович _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник зав.каф.Пархомей Ігор Ростиславович _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант _____ Лісовиченко О.І. _____

(назва розділу)

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент зав.каф.дтн, професор Дружинін В.А. _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2019 року

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет інформатики та обчислювальної техніки

Кафедра технічної кібернетики

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність 126 «Інформаційні системи та технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ І.Р. Пархомей

(підпис)

«___» _____ 2019 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Сопільняку Данилу Олеговичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Підвищення швидкості системи керування платформою
робота»,

науковий керівник дисертації _____ зав.каф. Пархомей Ігор Ростиславович _____

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «13» березня 2019 р. №877-С

2. Термін подання студентом дисертації _____ 19.05.2019 _____

3. Об'єкт дослідження Система керування автономним підводним роботизованим апаратом.

4. Предмет дослідження технології підвищення стійкості роботи системи.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити ог Аналіз структури роботи технічних платформ ; Розробка структури та алгоритмів керування роботою технічною платформою; Оцінка ефективності системи керування роботом.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу – 3 плакати

7. Орієнтовний перелік публікацій – одна публікація

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Перевірка на співпадіння	Лісовиченко О.І		

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз предметної області та постановка задачі	05.02.2019 р.	

2	Аналіз структури робото технічної платформи	11.02.2019 р.	
3	Постановка проблеми управління автономним підводним апаратом	18.02.2019 р.	
4	Розробка структури та алгоритмів керування робото технічною платформою	22.02.2019 р.	
5	Розробка рекомендацій щодо реалізації алгоритмів керування	01.03.2019 р.	
6	Оцінка ефективності системи керування роботом	11.03.2019 р.	
7	Оформлення пояснювальної записки до дипломної роботи	18.03.2019 р.	
8	Висновки	5.04.2019 р.	

Студент

(підпис)

Сопільняк Д.О
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

Пархомей І.Р.
(ініціали, прізвище)

АНОТАЦІЯ

У роботі виконано аналітичний огляд існуючих автоматичних гідродинамічних апаратів, проведено дослідження можливостей застосування процесорів нового покоління для покращення характеристик робота. Для вирішення задачі було вдосконалено конструкцію робота, а саме запропоновано застосування процесора нової серії i9 що значно розширює його можливості, як автоматизованого апарату. Також був розроблений новий алгоритм керування для системи керування роботом який оптимізує роботу робота та покращує його здатність проходити складні ділянки дна.

Ключові слова: підвищення стійкості системи, алгоритм керування, автоматизований підводний роботизований апарат, процесор, упори, рушії.

Розмір записки – 83 аркуші , 18 ілюстрацій , 4 таблиці , 3 додатки.

ABSTRACT

The research have analytical review automatic hydrodinamick robots, next gen processors opportunities research was conducted to improve robot characteristics. To solution to the problem construction of robot was improved, and proposed using new processor from new line i9 , he expands robots possibility for a lot . Also was developed new algorithm to robot management system, this algorithm optimizing robots work and improving he's possibility to pass hard parts of the bottom.

Keywords: increasing stability of system, algorithm management, automatic underwater robotic apparatus, processor, emphasis, streams.

Explanatory note size: 83 page containing 18 illustrations , 4 tables and 3 supplementary materials.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до магістерської дисертації

на тему: Підвищення стійкості системи керування платформою робота

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЕОМ - Електронна обчислювальна машина

ПРТП - Підводна роботизована технічна платформа

АПРА - Автоматизований підводний роботизований апарат

ГЛК - Гідролокатор

ІНС - інерціальна навігаційна система

Вступ

З давніх часів океан не тільки вабить людину своїми таємницями та нескінченними багатствами, але й лякає її. Сучасні технології знаходять вирішення цієї проблеми створенням таких технічних засобів дослідження океану при використанні яких людина не піддається небезпеці, а його дослідницькі можливості, не зменшуються, а навіть зростають.

У практиці океанологічних досліджень все більше використовують автономних підводних роботів для геологічних досліджень, для фотозйомки, пошуку затонулих об'єктів, у війсьній галузі, для розмінування та гідроакустичної розвідки.

При досягненні сучасного рівня розвитку інформаційних технологій автономні підводні роботизовані апарати (АПРА) здатні, не наражаючи на небезпеку особовий склад, ефективно вирішувати цілий ряд можливих завдань. Сучасні АПРА оснащені комплексом систем на приладів, які забезпечують самостійний рух апаратів під водою, керування здійснюється автономно по програмі, закладеній в пам'ять бортового комп'ютера, з використанням інерціальної навігаційної системи (ІНС) та доплірівського лага з періодичним уточненням місця знаходження за даними супутникової радіонавігаційної системи. Впровадження таких технологій дозволяє АПРА вже на сьогоднішній день займати важливе місце у структурі розвідувально-інформаційної системи роз'яснення підводної обстановки.

В перспективі АПА, маючи великий радіус дії повинні будуть виконувати спостережні функції, знаходячись у значному віддаленні від своїх сил забезпечення (створення ефекту довгої руки) з метою ведення потаємної розвідки та здійснення контролю обстановки на дальніх підступах до акваторій портів, виявлення можливих загроз силам флоту та своїм комунікаціям від підводних сил та засобів противника. В процесі розвитку АПРА стануть важливим елементом складних бойових систем, в які будуть

входити атомні та не атомні підводні човни , глибоководі апарати,традиційні та перспективні види оборонного та наступально підводного озброєння.

Кардинальним питанням при розробці та експлуатації АПРА є питання про рух: яким він повинен бути, як він повинен адаптуватися при зміні обстановки та якими повинні бути основні системи робота, здатні забезпечити такий рух? Математичне формулювання заданих якостей руху робота виражається у спеціальних програмах або алгоритмах руху, які зв'язують між собою у вигляді рівнянь параметри зовнішньої середовища та координати робота або їхні похідні.

Кожна з програм руху реалізується у певних обставинах , у яких може знаходитися АПРА. Іншими словами необхідно заздалегідь передбачити різні ситуації, поява яких вірогідна при роботі поблизу складного рельєфу дна.

1 Аналіз існуючих способів підвищення стійкості автономного підводного роботизованого апарату

Інформаційно - обчислювальний комплекс АПРА здійснює класифікацію обстановки , переключення програм руху , вимір відхилень реального положення та швидкостей апарата від заданих. Так як програмне , або ідеальне, положення АПРА задається алгоритмами руху, то аналіз цих алгоритмів дозволяє з'ясовувати необхідні інформаційні потоки та способи їх обробки. Через те, що швидкість АПРА не велика, єдиним засобом керування апарата є рушії, їх кількість та розміщення визначає кількість ступенів свободи, за якими АПРА може керуватися. Необхідна кількість керованих ступенів свободи виходить з програм руху.

Питання про вибір структури рухового комплексу АПРА (кількість різного типу рушіїв та їх взаємного розташування) до цього часу вирішується емпірично. При цьому важливо обрати рушійний комплекс, який забезпечує мінімальні енергозатрати.

Використання принципу надлишковості для оптимізації керування рухом АПРА

На існуючих АПРА першого покоління зазвичай застосовуються нерухомо закріпленні гребні гвинти , а також горизонтальні та вертикальні рулі. Ні на одному з цих АПРА неможливо одночасно керувати по всім шести ступеням свободи. Достатньо розповсюдженим типом рушіїв АПРА є гребні гвинти на поворотних колонках. Можливість повороту вектору упору дозволяє скоротити загальну кількість рушіїв. Для управління по всім шести ступеням свободи достатньо трьох гребних гвинтів на поворотних колонках. Але у підводному апаратобудуванні визначається тенденція до збільшення кількості рушіїв зверх мінімально необхідних. На телекерованому апараті ANGUS003 (Великобританія) розміщено десять нерухомо закріплених гребних гвинтів. На жилі апараті ДЖОНСОН С ЛИНК (США)

встановлено дванадцять кормових гвинтів , два носових поворотних гвинта горизонтального руху , та два поворотних вертикального руху. На апараті DSRV(США)- два лагових гвинта у трубах та два вертикальних гвинта, окрім того, є кормовий грибний гвинт з поворотньою у двох площинах насадкою , крендиферентна система та система регулювання плавучості. На глибоководному апараті TANKAI (Японія) встановлені дев'ять водометних рушіїв. На усіх цих апаратах кількість керованих органів більше кількості ступенів свободи ,але це дозволяє оптимально керувати рухом. Один із самих складних „механізмів” – організм людини має величезну ефекторну надлишковість. Наприклад, при ходьбі для керування трьома ступенями свободи кожної ноги задіяно біля сорока м'язів. При цьому дослідники вважають що саме ця надлишковість і дозволяє оптимально керувати рухами.

Та навіть в ході експериментів доведено, що якщо обрати не три , а чотири пари реактивних двигунів, то можливо досягнути зниження витрат палива на створення необхідних керуючих моментів. Таким чином, пропонується використовувати надлишковість для зменшення витрат палива завдяки оптимальному вибору тяг рушіїв. АПРА потребує зменшення витрат енергії акумуляторних батарей, а також створення не тільки керуючого моменту, але й сили. При цьому рушійний комплекс повинен працювати безперервно.

Один з способів ефекторної надлишковості передбачає рушійний комплекс, складений з чотирьох грибних гвинтів у насадках. Гвинти встановлені на поворотних колонках. У комплексі можливо незалежно регулювати чотири кутові швидкості обертання гвинтів та чотири кути повороту колонок. Система надлишкова для керування по шести ступеням свободи, тобто заданий головний вектор керуючого моменту та сили можливо створити при різних поєднаннях векторів упорів на рушіях. Це дозволяє обрати оптимальне значення упорів , та знизити енерговитрати на рух.

Вибір потужності двигунів

Після вибору структури рушійного комплексу , тобто числа, типа і компоновки рушіїв, необхідно визначити потужність двигунів для кожного з них. Для АПРА важливе значення має вертикальний рух , який забезпечує спостереження дна та обхід перепон. В даний час можливо виділити два підходи до методу вибору вертикальних рушіїв: перший заснований на тому що вертикальні опори повинні забезпечити зависання АПРА при заданій остаточній плавучості, при другому основним є час спуску АПРА на задану глибину. Обидва підходи ґрунтуються на виділені переважно вертикального руху.

При роботі АПРА на складному рельєфі та маневруванні у вертикальній площині переважного напрямку немає. Тому актуальною є розробка теоретичного підходу к визначенню упорів рушіїв АПРА, які працюють в цьому режимі. Невірний вибір потужності вертикальних рушіїв може сильно ускладнити керування АПРА на складному рельєфі.

1.1 Аналіз структури робото технічної платформи

1.1.1 Аналіз впливу різновидів машинного інтелекту на стійкість АПРА

По суті АПРА не що інше як самохідний робот. З цієї точки зору розрізняють три різновиди машинного інтелекту роботів: програмний , адаптивний , та інтелектуальний.

Програмні системи працюють по жорсткій , заздалегідь задній , програмі та потребують безпосередньої участі оператора у процесах обробки інформації та керування. До них відносяться більшість високо автоматизованих та роботизованих систем.

Адаптивні, здатні до самоналаштування структури та параметрів системи керування в умовах що змінюються. У них жорстка програма замінена на програму керування зі зворотнім зв'язком у відповідності з поточним станом системи та зовнішньої середовища , тобто передбачено ситуативне керування, засноване на множині відомих ситуацій.

Інтелектуальні системи здатні до самоорганізації, цілеспрямованих дій та до самонавчання у процесі виконання завдання. Існуючі сьогодні АПРА являють собою , як правило, програмовані та адаптивні роботи, але майбутнє без сумніву належить інтелектуальним підводним робототехнічним системам.

Сучасні системи штучного інтелекту знаходять свою реалізацію у створенні так званих експертних систем , які являють собою машинні програми , в рамках яких приблизно моделюються дії кваліфікованих спеціалістів.

У процесі виконання різноманітних робіт , що проводяться в океані за допомогою АПРА різних типів , зокрема при розвідці покладів нафти , будівництві підводних конструкцій так споруд , обслуговування підводного

нафтообладнання і т.д. Широке застосування знаходять гідроакустичні маяки. В районі робіт зазвичай використовуються декілька таких маяків, які встановлюються на дні моря або монтуються на підводному обладнанні. Для визначення їх взаємного положення у відносній або географічній системах координат розраховується відстані між маяками, що супроводжуються багаторазовими вимірами відстаней від судна до маяків. При цьому відміряні відстані співвідносяться з координатами судна, визначеними у моменти вимірів за допомогою супутникових або радіо навігаційних засобів. Кінцева обробка інформації відбувається на судовій ЕОМ.

Пошук шляхів економії часу в ході виконання робіт з використанням маяків призвів до ідеї безпосереднього виміру відстаней акустичним методом „запит-відповідь„. Передбачається доробка конструкції гідроакустичних маяків шляхом введення спеціального режиму калібровки, які стають ретрансляторами акустичних сигналів відповіді інших маяків. Це дозволяє виміряти сумарний час розповсюдження сигналу від судна-носія бортової апаратури до маяка-ретранслятора, далі до решти маяків та назад. Час розповсюдження сигналу до кожного маяка визначається шляхом їх послідовного опитування.

Деякі конструкції гідроакустичних маяків мають вбудовану мікро ЕОМ з набором стандартних програм обробки інформації, що обирається за бажанням користувача.

Декілька років тому вийшла серія маяків разового використання з неметалічними корпусами. Вони прості у виготовленні, технологічні та не потребують захисту від корозії. До того ж за рахунок власної позитивної плавучості такі маяки забезпечують необхідний підйом над дном моря без використання поплавків. Це спрощує постановку маяків з суден у позиційному положенні. Їх вартість значно нижче у порівнянні із вартістю маяків у металічних корпусах, що мають близькі технічні параметри.

За думкою спеціалістів, створення нового типу гідроакустичного приладу – багатофункціонального гідроакустичного маяка – забезпечує більш ефективне рішення багатьох проблем по освоєнню Мирового океану. Як уже показала практика, використання багатофункціональних гідроакустичних маяків з мікро ЕОМ та датчиками гідрологічних параметрів в поєднанні з відповідною бортовою апаратурою дозволяє значно скоротити затрати часу на виконання робіт за допомогою АПРА і забезпечити підвищення точності підводних вимірів.

Зараз значно спростилася процедура робіт при використанні малогабаритних прив'язаних АПРА низької вартості з маломірних суден. Точна постановка малогабаритних буїв-відповідачів зростає за рахунок використання нової портативної супутникової, навігаційної системи, яка випускається у вигляді компактного вологонепроникного приладу габаритами 22×9×6 см та масою 0.675 кг . На жидкокристаличному дисплеї безперервно висвічується широта та довгота місця з точністю до 30 метрів і час з точністю до 0.1 мс. За бажанням користувача в пам'ять приладу можна ввести до 50 маршрутних точок, розрахувати пеленг та відстань до них, показати миттєві значення швидкості , путьову швидкість під час слідування до заданої точки , очікуваний час приходу та величину похибки у визначенні місця. В цій системі використовуються одноканальний приймач , який автоматично обирає сигнали від трьох штучних супутників землі , які розташовані на оптимальних орбітах.

Великою проблемою залишається визначення місця положення автономних підводних роботизованих апаратів, при виконанні ними довгих рейсів особливо в арктичних районах.

Дослідження, які проводилися останні десятиліття багатьма країнами для ретельного виміру рельєфу та структури дна океану призвели до створення докладних цифрових банків гідрографічних даних. При введенні цих даних у пам'ять бортової ЕОМ автономного підводного роботизованного

апарату стає можливим здійснювати його навігацію по рельєфу дна. При цьому відстань від ґрунту та його рельєф визначається за допомогою багато променевого ехолота та безперервно порівнюється з даними з указанного банка. Там де дно не має яскраво виражених особливостей , передбачається використання програмуємого автопілота, який працює у режимі обчислення координат з визначенням абсолютної швидкості пересування підводного апарата високоточним гідроакустичним лагом. Крім цього вивчаються можливості використання на АПРА інерціальних навігаційних систем з лазерними та волоконно-оптичними гідроскопами.

1.1.2 Складності адаптації відео зображень для АПРА

Дистанційне керування підводними телекамерами відбувається з пульта відео-контрольного пристрою , виконаного у вигляді стійки. Використання додаткового мультиплексора дозволяє передавати відео сигнали від двох телекамер по одному коаксильному кабелю. Запропонована стереотеленавізійна системи для АПРА дозволє зменшити на 75% час , на пілотування апарату та виконання операцій за допомогою його маніпуляторів. Маючи перед очима просторове зображення підводної обстановки, оператор працює більш ефективно: допускає менше зайвих рухів, підвищується його упевненість у своїх діях.

Зараз розглядається проблема створення систем передачі зображення з АПРА на судно-носій. Для АПРА передбачено 2 режими передачі зображення: При управлінні апаратом та при виконанні пошукових робіт, в останньому випадку зображення складається з 1280x1280 елементів. Швидкість передачі зображення 500 Кбит/с темп в якому інформація може передаватися через воду дуже сильно обмежений властивостями середи. Зображення отримані у реальному масштабі з АПРА потребують відео компресії тобто „ стиснення зображення„ . Досягнута величина стиснення 60/1 будь якого дійсного морського зображення при використанні взаємного

крування складеного з різних елементів з використанням комп'ютерної програми корекції помилок.

Створення адаптивної системи управління АПРА , наділеною елементами штучного інтелекту, доволі складна задача.

Питанням машинної обробки відеозображень приділяється зростаюча увага. Особливий інтерес викликає можливість використання систем технічного зору у цих АПРА . Вже розроблені системи вводу та обробки зображень, що відрізняються гнучкістю алгоритмів , що лежать в їх основі , модульністю структури та високою швидкістю. Ці системи можуть працювати у наступних режимах:

1. режим автоматизованої візуальної інспекції дозволяє „проглядати,, до 10^8 елементів зображення за 5 секунд , що відповідає еквівалентній швидкодії 20 Мб\с.

2. Режим зору, у функції якого входить не тільки визначення положення об'єкта але й його розпізнання. Для рішення цих задач використовується твердотільні телекамери , підключені до швидкодіючих спеціалізованих процесорів.

3. Режим безконтактних вимірів, які можна розділити на дві категорії:

а) автоматичний контроль(приведення вимірів лінійних розмірів) ;

б)автоматичне позиціонування (вимір точного взаємного положення об'єктів).

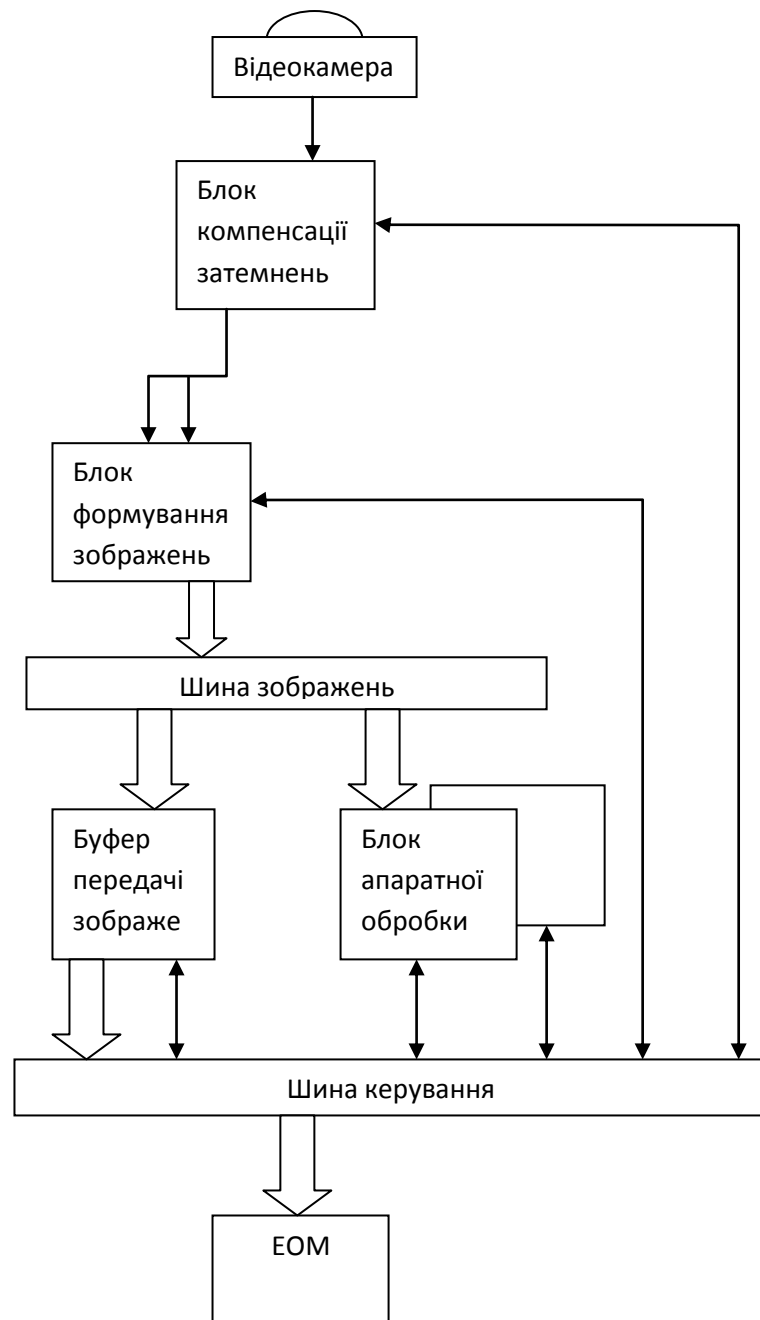


Рисунок (1) Структурна схема системи технічного зору

При програмній обробці відео данні заносяться у буфер формування зображення та передаються у ЕОМ через шину керування. ЕОМ здійснює обробку програмними засобами. Недоліком такого способу обробки є відносно не висока швидкість , а також обмежений розмір зображення.

При апаратній обробці основний об'єм обчислень беруть на себе спеціалізовані процесори. У ЕОМ передаються тільки результати обробки для заключного аналізу. Вибір апаратних процесорів залежить від конкретного використання системи.

Блок компенсації затемнень в цих системах дозволяє встановити неоднорідність зображення, обумовлену нерівномірним освітленням, затемненням лінз або не однорідною чутливістю камери. Він включається між телекамерою та блоком формування зображення і працює незалежно або під керуванням ЕОМ.

Проблема створення АПРА , наділених елементами штучного інтелекту, безперервно пов'язана з проблемою створення нового покоління датчиків, які могли б взяти на себе деякі функції обробки отриманої інформації , перед тим як подавати її на потік.

Напівпровідникові датчики , об'єднують у одному кристалі чутливий елемент та схему обробки сигналу. Схема обробки може обробляти наступні операції: посилення сигналу , корекцію нуля та чутливості, лінеарізацію характеристик, компенсацію апаратних змін, фільтрації, запам'ятовування результатів виміру , попередню обробку інформації. Суміщення чутливого елемента та схеми обробки відкрило додаткові можливості для покращення метрологічних характеристик датчиків , дозволило підвищити їхню точність , розширити діапазон вимірів та розгрузити центральний процесор вимірювальної системи. Не дивлячись на ускладнення технології вдалося зменшити вартість таких датчиків за рахунок зниження вимог до чутливих елементів.

Великою проблемою залишається зв'язок АПРА з береговими центрами управління. У передачі великого об'єму інформації на АПРА успіху досягнуто за допомогою лазерів , що працюють у сине-зеленому

діапазоні довжини хвиль, що дозволяє сигналу проникати глибоко під воду. Для забезпечення надійного зв'язку необхідно щоб лазерний передатчик, встановлений на супутнику випромінював імпульси тривалістю 20-1000 Нс з енергією 1-10 Дж та частотою повторень 10-1000 Гц. При цьому середня потужність повинна складати не менше 1 квт. Розробка лазерних передатчиків, систем керування та наведення лазерного променя є складною науково-технічною задачею, у вирішенні якої приймає участь значне число дослідницьких лабораторій, університетів та великих фірм.

1.2 Постановка проблем керування автономними підводними апаратами та формування шляхів їх вирішення

Одна з найбільш гострих наукових проблем управління АПРА визначається існуючим протиріччям. З одного боку, між значно підвищеною значимістю розробок в області прийняття найбільш раціональних рішень по управлінню АПРА в умовах ведення інформаційного протиборства, та з іншої сторони низькою адекватністю математичного, алгоритмічного та програмного забезпечення, що використовуються в автоматизованих системах управління. Подолання протиріч між станом теорії та вимогами практики в сфері керування АПРА визнає необхідність рішення ряду завдань наукового характеру спрямованих на узагальнення та розвиток ряду положень теорії систем та прийняття рішень. Їх реалізація на практиці дозволить сформулювати систему основних ідей, які дають цілісне уявлення про закономірності, принципи та тенденції рішення нових задач в системах керування АПРА, сукупність яких є новим внеском в даному напрямку досліджень.

Складність задач аналізу та синтезу процесів пов'язаних з прийняттям керівних рішень, обумовлено цілим рядом особливостей, виділимо чотири відмінні особливості, які обумовлюють вибір математичного забезпечення,

яке в найбільшому ступені відповідає вимогам функціонуванням систем управління АПРА:

- 1) Кожний проміжний та тим більше кінцевий етап розвитку процесу керування АПРА завершується прийняття рішення про вибір одного з можливих варіантів опису ситуації та можливих дій в ній з заданого, або безкінечного передня альтернатив;
- 2) Вибір керівних рішень в АПРА проводиться на основі даних , що поступають в реальному масштабі часу, а також на основі накопиченої інформації та знань реального процесу;
- 3) Відомості та знання в умовах інформаційного протиборства можуть бути не повними , не достовірними або застарілими (поступати на обробку в АПРА зі значною затримкою);
- 4) Для вибору найбільш обґрунтованих керуючих рішень в АПРА проводиться обробка даних спостереження та вимірювання з ціллю отримання високоякісної інформації та відкидання дезінформації.

В рамках даної задачі розвитку системи керування АПРА будемо вважати, що особи, приймаючі рішення, або спеціальне математичне забезпечення АПРА можуть вибирати один з можливих варіантів:

R1-рішення, засноване на знанні реальної обстановки ψ_1 , рішення що забезпечує досягнення цілі АПА.

R2-рішення засноване на інформації низької якості (в тому числі дезінформації) ψ_2 , рішення що виключає можливість досягнення цілі.

Під поточною ситуацією на основі якої приймається рішення по керування АПРА будемо розуміти стан розподіленої інформаційно-керуючої метосистеми, яка містить опис заданого району.

В якості наглядної схеми можна розглянути застосування роботизованого комплексу „Суррогат„ представленого на Рис 2.

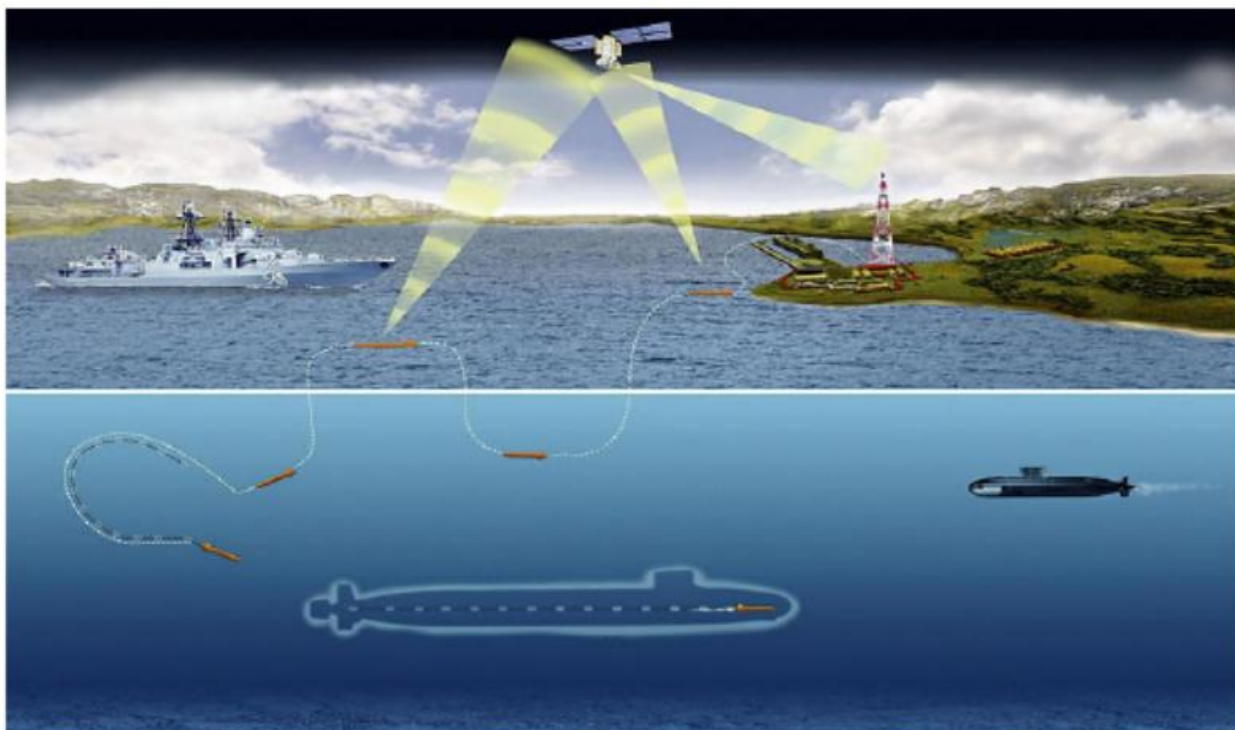


Рисунок.(2) схема застосування АПРА з берега

Для вирішення задач розвитку системи управління АПРА використовують методи штучного інтелекту, когнітивного аналізу та синтезу слабо структурованих систем, тому що саме ці методи дозволяють вирішувати задачі керування розвитком ситуацій в складних розподілених системах в умовах невизначеності різного роду. Використання даних методів дозволяє вирішити ряд конкретних задач що виникають при керуванні безпілотними морськими системами і комплексами різного призначення:

1) Не повнота інформації(вихідних даних) по бойовій(оперативній) обстановці, що не завжди дозволяє коректно вирішити задачі по керуванню АПА,та значно знижує адекватність прийнятих рішень або зовсім не дозволяє отримати оптимальне рішення(наприклад, в аварійних ситуаціях).

Системи штучного інтелекту мають здібність приймати рішення в більш широкому діапазоні різних ситуацій, в тому числі за рахунок функцій саморозвитку (самоперепрограмування при виявленні ситуації, реакція на яку алгоритмічно не була передбачена).

2) Дезінформація або отримана інформація низької якості в потоці вхідних даних в умовах ведення інформаційного протиборства потребує розробки методів структуризації, класифікації та формалізації даних у різних проблемних областях(воєнній, технічній, психологічній, організаційній і т.д.)

для забезпечення прийняття адекватного рішення задач в процесі підготовки та ведення бойових дій.

3) Системи штучного інтелекту дозволяють пристосовуватися до нових чи схожих ситуацій, приймати рішення в умовах ситуаційної невизначеності, навчатися та запам'ятовувати досвід а також використовувати абстрактні концепції.

Визначимо наступні першочергові напрямлення досліджень, які у загальному вигляді можуть відповідати сформульованій вище постановці задачі розвитку системи керування АПРА:

-розробка методології найбільш раціонального розподілення функцій управління між елементами слабоструктурованих систем, вибір та обґрунтування системних задач аналізу і синтезу обстановки на морського театру військових дій(МТВД);

-розробка методів їх рішення; побудова структури синтезованої системи з бажаними властивостями по координації дій роботизованих систем з силами флоту.

При розробці та практичному використанні таких задач важливу роль грають когнітивні здібності розробників-експертів в заданій предметній області. В задачах такого класу багато уваги приділяється, ризику “людського фактору”, який має місце як в реальних системах при прийнятті рішень, так і в процесі їх моделювання людиною на етапі створення роботизованих комплексів. Це пов'язано з тим що процес пізнання розглянутих систем за допомогою розробленого інструментарію. включається в метамодель дослідження об'єкту. Тому існуючі розробки на основі когнітивної методології треба віднести до інтелектуальних технологій які дозволяють створювати інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень.

Результати досліджень отримані за допомогою когнітивних методів засновані на використанні у якості вихідних даних різних відомостей про можливі тенденції розвитку при гіпотетичних змінах факторів або їх сполучень у модельованому майбутньому. У якості таких прогнозованих

даних можуть бути використані значення чисельних показників, які отримані за допомогою обробки даних про вже здійснених процесах.

Термін	Визначення терміну
Ефективність системи	Ступінь відповідності системи своєму функціональному призначенню і цілям, поставленим при її створенні
Стійкість системи	Збереження працездатності в умовах інформаційного протиборства на період рішення задачі
Стійкість управління	Характеристика системи, побудована на основі міри збурюючої взаємодії, перевищення якої веде до виходу вектора помилки керування за дозволені межі
Інформаційна стійкість	Властивість системи забезпечити заданий рівень якості інформації (повнота, достовірності, оперативності) в умовах випадкової або навмисної взаємодії
Оперативність	Властивість системи вирішувати свої задачі за проміжок часу необхідні для ефективного функціонування
Достовірність	Властивість системи до адекватному інформаційному опису обстановки
Повнота	Властивість системи до обліку необхідності переліку реальних значень характеристик обставин

Вирішення задачі оцінки обстановки та наступного прийняття керівних рішень при практичному використанні АПРА в різних умовах, обумовлених як внутрішніми структурними перетвореннями так і зовнішніми деструктивними впливами висуюють на перший план питання забезпечення стійкості управління та інформаційної стійкості створеної системи. При наявності збурень задача синтезу системи управління полягає в переводі параметрів системи в бажану область допустимих значень, яка визначається областю стійкості. Таким чином, у загальній постановці вирішення протиріччя „стійкість-нестійкість„ складається з визначення системи припущень на зміну інформаційних параметрів системи при яких зберігається стійкість управління.

1.3 Можливі шляхи підвищення стійкості системи керування роботою технічною платформою

Розглянемо докладніше три різновиди машинного інтелекту роботів: програмний, адаптивний, та інтелектуальний.

Програмні системи працюють по жорсткій, заздалегідь заданій програмі та потребують безпосередньої участі оператора у процесах обробки інформації та керування. До них відносяться більшість високо автоматизованих та роботизованих систем.

Адаптивні здатні до само налаштування структури та параметрів системи керування у умовах що змінюються. У них жорстка програма замінена на програму керування, зі зворотнім зв'язком у відповідності з поточним станом системи та зовнішньої середовища, тобто передбачено ситуативне керування, засноване на множині відомих ситуацій.

Інтелектуальні системи здатні до самоорганізації цілеспрямованих дій та до самонавчання у процесі виконання завдання. Існуючі сьогодні АПА являють собою, як правило, програмовані та адаптивні роботи, але майбутнє без сумніву належить інтелектуальним підводним робототехнічним системам.

Сучасні системи штучного інтелекту знаходять свою реалізацію у створенні так званих експертних систем, які являють собою машинні програми, в рамках яких приблизно моделюються дії кваліфікованих спеціалістів.

Розробка алгоритмів роботи, його „інтелекту“, є одним з основних етапів створення АПА відмінності принципів та задач руху визначає велику різноманітність підходів до їх вибору. Однак, не дивлячись на вагомості відмінності, можливо виділити клас роботів, умови функціонування яких зв'язані з подоланням різноманітних перепон на місцевості. Само поняття

„перепона,, залежить від цільових задач робота. Розроблені на цей час методи виявлення та обходу перепон можуть стати корисними при створенні алгоритмів для адаптивних підводних роботів. При цьому необхідно враховувати наступну специфіку функціонування АПРА.

Джерелом вхідних даних, за якими можна судити про характер рельєфу в районі досліджень, є карти, проміри ехолоту з судна (однак вони не дозволяють судити про зміну рельєфу дна на дистанції 10-20 метрів , необхідній для керування апаратом);

місце знаходження апарату , як правило , виявляється по системі донної гідроакустичної навігації(точність навігації порядку десятка метрів, при роботі на складному рельєфі можливе попадання робота у затемненні від гідроакустичних маяків зони, де неможливо з'ясувати місце знаходження робота);

при роботі на складному рельєфі дальність дії інших гідроакустичних засобів, встановлених на роботі, також обмежена.

З урахуванням цих особливостей розглянемо розроблені для різноманітних керованих систем типи алгоритмів. Найбільш прості з них ґрунтуються на жорстких, не залежних від зовнішніх умов програмах рухів.

Як правило, для підводних роботів в якості вихідних даних задається глибина або відстань від ґрунту , курс та час руху на ньому. Для АПРА працюючого на складному рельєфі цей метод не прийнятний , тому що не враховує випадок виникнення перепон.

Найбільш багато численний клас алгоритмів керування для роботів , функціонуючих у середовищі з перешкодами, зв'язаний з ідеєю класифікації обстановки або окремих перепон. Підводний робот не може отримати повні характеристики розмірів перепон на складному рельєфі, тому алгоритми руху

робота повинні ґрунтуватися на неповній інформації про рельєф. Але навіть якщо вдасться отримати повну інформацію та на її основі спланувати певну траєкторію обходу, відстежити її точно буде дуже складно через особливості гідроакустичної системи навігації, про які казали вище. А це може привести до небезпечних зіткнень.

Результатом роботи такої машинної програми є вихідна інформація (або керуючої дії), відповідна правильним діям високо кваліфікованої людини. Блок-схема експертної системи показана на Рис 1.

Однією з форм представлення інформації в базі знань експертної системи є фрейм-засіб відображення структурованих ситуацій. Фрейм містить слоти, які зберігають фрагменти інформації важливої для визначення будь-якої конкретної ситуації, або що являє собою характерні властивості або признаки об'єкта. Наприклад, фрейм „об'єкт пошуку„ містить слоти, які характеризують тип об'єкту: його розміри, форму, колір, наявність характерних фізичних полів, можливі положення на ґрунті і т.п.

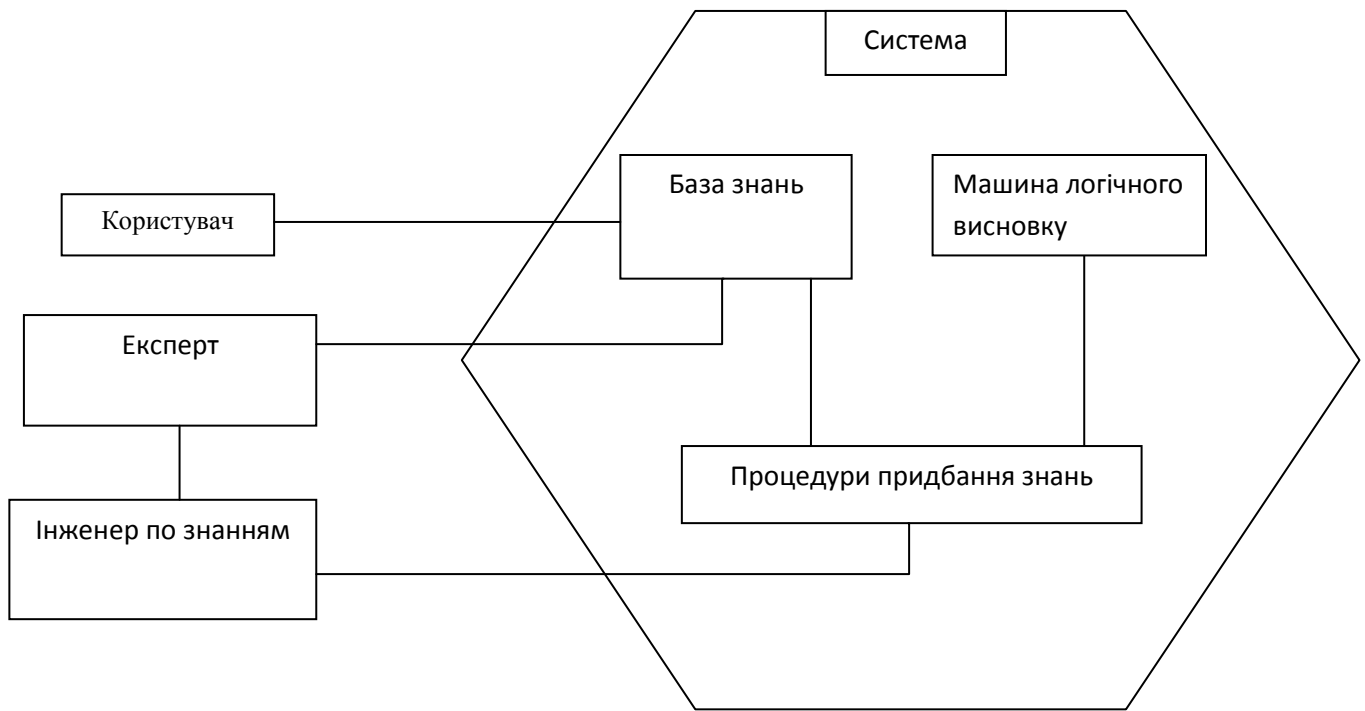
Другою частиною бази знань є відношення над знанням. Компоненти баз знань експертних систем описуються, за звичай, по типовій схемі:

- Факти;
- Правила та процедури;
- Логічні відношення;
- Алгоритми;
- Евристичні моделі.

База знань експертної системи завжди специфічна для даної конкретної області.

Наступною важливою частиною експертної системи є машина логічного виводу, яка являє собою охоронний блок, що знаходиться між базою знань та її діючою програмою. Цей блок несе відповідальність за

додавання та виключення окремих знань, а також за побудову логічних висновків. В цьому блоці для отримання висновків використовуються методи використання різноманітних інтелектуальних стратегій.



Рисунок(3). Блок схема експертної системи

Впровадження експертних систем вирішує наступні питання їх подальшого розвитку:

- Придбання та структурування;
- Функціонування в режимі реального часу;
- Робота у непередбачених умовах;
- Роботах в умовах невизначеності.

Результати багатьох досліджень довели можливість надання системі керування АПРА елементів „штучного інтелекту” , що стимулювало подальше дослідження, спрямовані на швидшу розробку спеціалізованих експертних систем. Алгоритми, що використовуються в експертних системах АПРА суттєво відрізняються від звичайних алгоритмів обробки числової інформації. В цих алгоритмах для отримання адекватного рішення використовуються слова, поняття або інші аналогічні елементи ,що робить їх роботу схожою на роботу людського інтелекту, що оперує з великим об’ємом знань. Проблема полягає в розробці методів ефективного моделювання цих знань, щоб їх можливо було використати у процесі прийняття рішень в модулі, що керує поведінкою АПРА. Ця задача ускладнюється необхідністю прийняття рішень в реальному масштабі часу.

АПРА , що діє у перемінних умовах , необхідність рішення за малими витратами часу накладає суворі обмеження на можливості систем управління та навігації. Хоча швидкість руху підводного апарата відносно мала, на прийняття рішення зазвичай відводиться не більш ніж 5-10 секунд, а для датчиків та інших приладів працюючих в реальному масштабі часу, характерні значення постійних часу не перевищують частки секунди.

Спеціалістами в області штучного інтелекту встановлено що „інтелектуальність,, поведінки пов’язана не стільки з якістю процесу прийняття рішення , скільки з тими знаннями, що полягають у його основі.

Чим більший об’єм знань приймається до уваги, тим більше якість рішення. Отже проблема в тому щоб зробити наявні знання придатними для використання в процесі прийняття рішень що ускладнюється необхідністю його прийняття за дуже короткий термін.

Висновки

Проаналізувавши існуючі способи підвищення стійкості АПРА ми дійшли висновку, що на стійкість системи керування АПРА значний вплив вчиняє:

- вибір структури АПРА , тому що засобом керування апарата є рушії, їх кількість та розміщення визначає кількість ступенів свободи, за якими АПРА може керуватися. При цьому важливо обрати рушійний комплекс, який забезпечує мінімальні енергозатрати.
- використання принципу надлишковості. Для управління по всім шести ступеням свободи достатньо трьох гребних гвинтів на поворотних колонках, але у підводному апаратобудуванні визначається тенденція до збільшення кількості рушіїв зверх мінімально необхідних тому що, якщо обрати не три , а чотири пари реактивних двигунів, то можливо досягнути зниження витрат палива на створення необхідних керуючих моментів. Таким чином, пропонується використовувати надлишковість для зменшення витрат палива завдяки оптимальному вибору тяг рушіїв.
- вибір потужності. Розробка теоретичного підходу до визначення упорів рушіїв АПРА, які працюють у вертикальному режимі дуже важливий етап проектування тому що невірний вибір потужностей вертикальних рушіїв може сильно ускладнити керування АПРА на складному рельєфі.
- використання різних видів машинного інтелекту та електронного супроводу.
- машинна обробка відеозображень. Вона дає можливість використання систем технічного зору у АПРА . Вже розроблені системи вводу та обробки зображень, вирізняються гнучкістю алгоритмів , що лежать в їх основі , модульністю структури та високою швидкістю.

- використання багатофункціональних гідроакустичних маяків з мікро ЕОМ та датчиками гідрологічних параметрів в поєднанні з відповідною бортовою апаратурою дозволяє значно скоротити затрати часу на виконання робіт за допомогою АПРА і забезпечити підвищення точності підводних вимірів.
- створення докладних цифрових банків гідрографічних даних. При введенні цих даних у пам'ять бортової ЕОМ автономного підводного роботизованного апарату стає можливим здійснювати його навігацію по рельєфу дна.
- Вирішення задачі оцінки обстановки та наступного прийняття керівних рішень при практичному використанні АПРА в різних умовах, обумовлених як внутрішніми структурними перетвореннями так і зовнішніми деструктивними впливами висувають на перший план питання забезпечення стійкості управління та інформаційної стійкості створеної системи. При наявності збурень задача синтезу системи управління полягає в переводі параметрів системи в бажану область допустимих значень, яка визначається областю стійкості. Таким чином, у загальній постановці інформаційних параметрів системи при яких зберігається стійкість управління є вирішальною при прийнятті керівних рішень

З метою удосконалення системи керування АПРА вирішено провести розробку структури та алгоритмів керування АПРА та виконати моделювання процесу функціонування удосконаленої системи керування АПРА

2.Розробка структури та алгоритмів керування підводною роботою технічною платформою

Побудова інтелекту підводного робота, який діє в умовах мінливої зовнішньої середовища, являє собою достатньо складну задачу. Підводний робот відрізняється вузько спеціалізованим призначенням з багато чисельних параметрів зовнішньої середовища можливо відокремити основні, без посередньо впливаючи на його головної задачі, тому що це пов'язано з рухом підводного робота поблизу дна, яке може мати достатньо складний профіль, основною метою системи управління робота є забезпечення безпечного руху та виконання поставлених задач в умовах не передбачених змін з оточуючого рельєфу. Отже перша задача в побудові „інтелекту„ підводного робота- розробка спеціальних алгоритмів або програм, що дозволять роботу адаптуватися до профілю дна. Для реалізації руху та визначення обстановки робота повинен мати необхідну інформацію(поперед усе про своє положення відносно дна та перепон). Такі виміри здійснюються акустичними гідролокаторами.

Одним за найбільш важливих параметрів при проведенні підводних досліджень є відстань від об'єкта до дна. Зазвичай фото системи дозволяє знімати зв відстані 4-8 метрів. Для практичних цілей використовується зйомка з різних дистанцій: від максимального віддалення від дна(планова зйомка) до відстані в 1 метр(при дослідженні дрібних структур рельєфу дна).

Таким чином рух підводного робота може відбуватися на відстанях від дна в діапазоні від 1-20 метрів в залежності від заданих задач. При використанні одного об'єктиву необхідно знати відстань до дна для визначення розмірів предметів на фотографіях що ми бачимо. Легше всього все зробити, якщо робот буде рухатися на постійній відомій відстані від ґрунту. При зйомці в однаковому масштабі з перекриттям легко зробити фотомонтаж.

Наступним важливим для фотозйомки параметром є кутова орієнтація камери. Для кількісної обробки фотографій необхідна вертикальна зйомка. В не керованих системах, де таку умову важко виконати, використовуються спеціальні засоби для фіксації відхилення осі фотокамери від вертикалі. В підводних роботах це забезпечується стабілізацією кутів крену та деферента робота.

2.1 Розробка структури системи керування робототехнічною платформою

Розглянувши загальну модель рушійного комплексу та проаналізувавши структури, які можуть забезпечити одночасне керування по шести ступеням свободи підводного апарата

Розглянемо загальну модель рушійного комплексу і на її основі проаналізуємо ті структури, які можуть забезпечити одночасне керування по шести ступеням свободи підводного апарата.

Нехай рушійний комплекс складається з $n_1 \geq 0$ нерухомо закріплених, $n_2 \geq 0$ поворотних та $n_3 \geq 0$ просторових рушіїв. Будемо використовувати наступні уявлення векторів упорів рушіїв: для нерухомих закріплених – через упор та направляючі косинуси лінії дій, для поворотних та просторових – через проекції вектора упора за пов'язані осі.

Нерухомо закріпленим рушіям присвоїмо номери від одиниці до n_1 . Позначимо: (l_{1a}, l_{2a}, l_{3a}) – координати точки кріплення рушія з номером a у пов'язаній системі координат AZ_k ; T_a – упор такого рушія; (c_{1a}, c_{2a}, c_{3a}) де $a = 1, 2, \dots, n_1$ – направляючі косинуси його лінії дій.

Поворотним рушієм дамо номери a від $n_1 + 1$ до $n_1 + n_2$. Позначимо: (l_{1a}, l_{2a}, l_{3a}) – координати точки кріплення; $(r_{1\beta}, r_{2\beta}, r_{3\beta})$, де $\beta = a - n_1$, – проекції вектора одиничної нормалі до площини обертання. Для збереження єдиної нумерації позначимо проекції вектора упору на AZ_k наступним чином: $T_{(3a-2n-2)}$ на ось AZ_1 ;

$T_{(3a-2n-1)}$ на ось AZ_2 ; $T_{(3a-2n)}$, де $a = n_1 + 1 \dots n_1 + n_2$, – на ось AZ_3 .

Рушіями з просторовим вектором упору присвоюємо номери a від $n_1 + n_2 + 1$ до $n_1 + n_2 + n_3$. Позначимо: (l_{a1}, l_{a2}, l_{a3}) – координати точки кріплення; $T_{(3a-2n-2)}$, $T_{(3a-2n-1)}$, $T_{(3a-2n)}$ – проекції вектору упора пов'язані осі AZ_k відповідно.

Проекція сумарної керуючої сили F та моменту M відносно плюса A , який створює даний рушійний комплекс, перенумеруємо наступним чином: $F_{Z1}=R_1, F_{Z2}=R_2, F_{Z3}=R_3, M_{Z1}=R_4, M_{Z2}=R_5, M_{Z3}=R_6$.

У прийнятих означеннях проекції сумарної керуючої сили й моменту R_i виразяться через T_k ;

$$R_i = A_{ik} T_k (i=1,2,\dots,6; k=1,2,\dots; n_1+n_2+n_3),$$

де матриця A_{ik} розміру $6 \times (n_1+3n_2+3n_3)$ має наступний вид:

$$A_{1a} = \begin{cases} c_{1a} \text{ при } a \leq n, \\ 1 \text{ при } a = n_1 + 3k - 2, \\ 0 \text{ при } a = n_1 + 3k - 1, \\ 0 \text{ при } a = n_1 + 3k \end{cases}$$

$$A_{2a} = \begin{cases} c_{2a} \text{ при } a \leq n, \\ 1 \text{ при } a = n_1 + 3k - 1, \\ 0 \text{ при } a = n_1 + 3k - 2, \\ 0 \text{ при } a = n_1 + 3k \end{cases}$$

$$A_{3a} = \begin{cases} c_{3a} \text{ при } a \leq n, \\ 1 \text{ при } a = n_1 + 3k, \\ 0 \text{ при } a = n_1 + 3k - 2, \\ 0 \text{ при } a = n_1 + 3k - 1 \end{cases}$$

$$A_{4a} = \begin{cases} l_{2a}c_{3a} - l_{3a}c_{2a} \text{ при } a \leq n, \\ 1 \text{ при } a = n_1 + 3k - 2, \\ 0 \text{ при } a = n_1 + 3k - 1, \\ 0 \text{ при } a = n_1 + 3k \end{cases}$$

$$A_{5a} = \begin{cases} l_{3a}c_{1a} - l_{1a}c_{3a} \text{ при } a \leq n, \\ l_{3a} \text{ при } a = n_1 + 3k - 2, \\ 0 \text{ при } a = n_1 + 3k - 1, \\ -l_{3a} \text{ при } a = n_1 + 3k \end{cases}$$

$$A_{6a} = \begin{cases} l_{1a}c_{2a} - l_{2a}c_{1a} \text{ при } a \leq n, \\ -l_{2a} \text{ при } a = n_1 + 3k - 2, \\ l_{1a} \text{ при } a = n_1 + 3k - 1, \\ 0 \text{ при } a = n_1 + 3k \end{cases}$$

Щоб проекції T_k можна було розглядати як незалежні змінні, до системи слід додати керування зв'язком. Для повторних рушіїв існує n_2 керувань зв'язку, які у прийнятих означення мають наступний вигляд:

$$r_{1\beta} T_{(n_1+3\beta-2)} + r_{2\beta} T_{(n_1+3\beta-1)} + r_{3\beta} T_{(n_1+3\beta)} = 0$$

$$(\beta=1,2,\dots,n_2)$$

Таблиця А

Загальний вигляд матриці структури рушійного комплексу A_{jk}

i	k=1	$3n_2$			
		$k=n_1+1$	$k=n_1+2$	$k=n_1+3$	$k=n_1+4$
1	$c_{11}...$	1	0	0	1
2	$c_{21}...$	0	1	0	0
3	$c_{31}...$	0	0	1	0
4	$(l_{21}c_{31} - l_{31}c_{21})...$	0	$-l_{3(n_1+2)}$	$l_{2(n_1+1)}$	$l_{3(n_1+2)}$
5	$(l_{31}c_{11} - l_{11}c_{31})...$	$l_{3(n_1+1)}$	0	$-l_{1(n_1+1)}$	$-l_{2(n_1+2)}$
6	$(l_{11}c_{21} - l_{21}c_{11})...$	$-l_{2(n_1+1)}$	$l_{1(n_1+1)}$	0	0
7	0...	r_{11}	r_{21}	r_{31}	0
8	0...	0	0	0	r_{12}
.
.
$6+n_2$	0...	0	0	0	0

Поеднавши рівняння X та Y в одну систему, отримаємо опис залежностей сумарної керуючої сили й моменту від незалежних змінних T_k у вигляді

$$\widetilde{A}_{ik}T_k=R_i \quad (2.1 \text{ A})$$

Де матриця-столбець

$$R_i = \begin{cases} R_i & \text{при } i \leq 6 \\ 0 & \text{при } i > 6 \end{cases}$$

A_{ik} – матриця розміру $(6+n_2) \times (n_1+3n_2+3n_3)$:

$$\widetilde{A}_{ik}=A_{ik} \text{ при } i \leq 6; \quad (2.1 \text{ Б})$$

$$\widetilde{A}_{(6+a)k} = \begin{cases} r_{1a} & \text{при } k = n_1 + 3a - 2 \\ r_{2a} & \text{при } k = n_1 + 3a - 1 \\ r_{3a} & \text{при } k = n_1 + 3a \\ 0 & \text{при } k > n_1 + 3a \\ 0 & \text{при } k < n_1 + 3a - 2 \end{cases} \quad (2.1 \text{ В})$$

Розгорнутий вигляд матриці \widetilde{A}_{ik} показаний у табл. А. Як впливає з виразів (2.1 В) та (2.1 Б), матриця структури рушійного комплексу \widetilde{A}_{ik} складається з елементів, які задають розташування та орієнтацію рушіїв, а розміри матриці залежать від кількості різних типів рушіїв. Таким чином, матриця задає структуру рушійного комплексу. Фізичний сенс матриці

наступний. Елементи перших шести строк показують, наскільки змінюється сумарна керуюча сила й момент при збільшенні значення упору нерушимого закріпленого рушія на одиницю або при такому самому збільшенні проекції упору поровертального або просторового рушія.

Продемонструємо що за допомогою матриці \tilde{A}_{ik} можливо виявити структуру рушійного комплексу робота, дозволяючого одночасно і незалежно керувати усіма шістьма степенями свободи, тобто у певному діапазоні для будь яких $\tilde{R}_1, \dots, \tilde{R}_6$ завжди можливо підібрати значення T_k , які будуть задовольняти рівнянню (2.1 А). Доведемо наступну основну властивість таких рушійних комплексів: за допомогою даного рушійного комплексу можливо одночасно і незалежно усіма шістьма степенями свободи робота тоді і тільки тоді, коли ранг відповідної матриці \tilde{A}_{ik} рівний $6+n_2$. Позначимо ранг матриці \tilde{A}_{ik} через $\text{rg } \tilde{A}_{ik}$. У еквівалентному формулюванні основна властивість буде виглядати наступним чином:

рішення системи рівнянь

$$\tilde{A}_{ik} T_k = \tilde{R}_i (i=1,2,\dots,(6+n_2); k=1,2,\dots, n_1+3n_2+3n_3) \quad (2.1 \Gamma)$$

відносно невідомих T_k буде існувати для будь яких значень $\tilde{R}_1, \tilde{R}_2, \dots, \tilde{R}_6$ тоді і тільки тоді, якщо

$$\text{rg } \tilde{A}_{ik} = 6+n_2 \quad (2.1 \Delta)$$

Доведемо достатність цієї умови. Нехай $\text{rg } \tilde{A}_{ik} = (6+n_2)$. Розглянемо розширену матрицю \tilde{B}_{ik} яка виходить з матриці \tilde{A}_{ik} додаємо до неї стовбець \tilde{R}_i . При додаванні стовпця ранг матриці не зменшується тобто

$$\text{rg } \tilde{B}_{ik} \geq \text{rg } \tilde{A}_{ik} \quad (2.1 \text{E})$$

З іншого боку, ранг матриці \tilde{B}_{ik} не може бути більшого числа строк у ній:

$$\text{rg } \tilde{B}_{ik} \leq 6+n_2 \quad (2.1 \text{E})$$

Зі співвідношень (2.1 Г) – (2.1 Е) витікає що

$$\text{rg } \tilde{B}_{ik} = \text{rg } \tilde{A}_{ik} = 6+n_2$$

Як відомо з теорії лінійних рівнянь, якщо ранг матриці системи лінійних рівнянь рівний ранг розширеної матриці, то рішення системи існує. Так як $\tilde{R}_1, \tilde{R}_2, \dots, \tilde{R}_6$, бралися довільними то й рішення системи рівнянь (2.1 Г) існує для довільних $\tilde{R}_1, \tilde{R}_2, \dots, \tilde{R}_6$, якщо $\text{rg } \tilde{A}_{ik} = 6+n_2$

Доведемо необхідність умови (2.1 Д). Нехай для деякої матриці \tilde{A}_{ik} рішення системи (2.1 Г) існує для будь яких значень $\tilde{R}_1, \tilde{R}_2 \dots \tilde{R}_6$. Доведемо що у цьому випадку $\text{rg} \tilde{A}_{ik} = 6 + n_2$. Доведення будемо вести методом від противного. Нехай $\text{rg} \tilde{A}_{ik} < 6$. Якщо $n_2 > 0$, то перейдемо від рівнянь (2.1 Г) до еквівалентній системи наступним чином. З визначення матриці \tilde{A}_{ik} слід, що у стрічці з номером $a > 6$ стоїть не більше трьох ненульових елементів:

$$\tilde{A}_{a\beta}, \tilde{A}_{a(\beta+1)}, \tilde{A}_{a(\beta+2)} (a=7,8,\dots,(6+n_2); \beta=n_1+3a-20)$$

До того ж один з цих трьох елементів не рівний нулю, так як це є проекції на пов'язаній осі одиничного вектору. Нехай у сьомому рядку не рівний нулю елемент $\tilde{A}_{7(n_1+1)}$. Домножуючи на сьомий рядок на $-1/\tilde{A}_{7(n_1+1)}$ та підсумовуючи її з першою, отримаємо перший рядок нової матриці \tilde{A}_{ik}^* , у якої $\tilde{A}_{1(n_1+1)}^* = 0$

Аналогічно можна отримати

$$\tilde{A}_{5(n_1+1)}^* = 0, \tilde{A}_{6(n_1+1)}^* = 0$$

Ранг матриці не змінюється, так як це перетворення відповідає помноженню \tilde{A}_{ik} на невиврожену матрицю. Після перетворення у (n_1+1) -м стовбці буде відрізнятись від нуля лише сьомий елемент. Аналогічні перетворення можливо зробити з іншими строками.

Таким чином, ми отримали еквівалентну систему рівнянь

$$\tilde{A}_{ik}^* T_k = \tilde{R}_i \quad (2.1 \text{ Ж})$$

Де матриця \tilde{A}_{ik}^* має наступні особливості.

Ранг \tilde{A}_{ik}^* рівний рангу \tilde{A}_{ik} . У матриці \tilde{A}_{ik}^* існує n_2 стовпців з номерами a_1, a_2, \dots, a_{n_2} , таких що

$$n_1 + 3\beta_k - 2 \leq a_k \leq n_1 + 3\beta_k (\beta_k = 1, 2, \dots, n_2)$$

та при цьому у стовпці з номером a_k відмінний від нуля лише один елемент у $(6+\beta_k)$ -у рядку.

Іншою особливістю матриці \tilde{A}_{ik}^* являє собою те, що елементи які стоять у стовпцях ші номером, меншим або рівним n_1

або більшим $n_1 + 3n_2$ співпадають з відповідними елементами матриці \widetilde{A}_{ik} :

$$\widetilde{A}_{ik}^* = \widetilde{A}_{ik} (k \geq n_1 + 3n_2, k \leq n_1)$$

Окрім того, по прийнятому положенню

$$\text{rg} \widetilde{A}_{ik} = \text{rg} \widetilde{A}_{ik}^* = M < 6 + n_2$$

У будь які М лінійно незалежні рядки матриці \widetilde{A}_{ik}^* обов'язково входять усі строки з номерами $i > 6$. Це виходить з того, що такий рядок неможливо отримати у вигляді лінійної комбінації інших, а М є максимальне число лінійно незалежних рядків. Тоді, так як $M < 6 + n_2$, завжди можливо вибрати такий рядок з номером $y < 6$, яка виходить у вигляді лінійної комбінації інших тобто існує М чисел c_1, c_2, \dots, c_M . Таким що

$$\widetilde{A}_{yl}^* = c_k \widetilde{A}_{\beta k}^* l,$$

Де β_k пробігає індекси М лінійно незалежних рядків. Також рішення системи управління (2.1 Ж) існує, то перші частини її рівнянь повинні задовольняти співвідношенню

$$\widetilde{R}_y = c_k \widetilde{R}_{\beta k} (\beta_k \neq y) \quad (2.1 \text{ З})$$

При цьому рівність (2.1 З) повинно бути справедливо при будь яких $\widetilde{R}_1, \widetilde{R}_2 \dots \widetilde{R}_6$, У такому випадку оберемо

$$\widetilde{R}_y = 1$$

$$\widetilde{R}_i = 0 (i \leq 6, i \neq y). \quad (2.1 \text{ И})$$

Підставляючи значення величин зі співвідношень (2.1 И) у вираз (2.1 З), отримаємо протиріччя:

$$1 = 0$$

Джерело протиріччя у тому що $M < 6 + n_2$. Отже, $\text{rg} \widetilde{A}_{ik}^* = \text{rg} \widetilde{A}_{ik} = M = 6 + n_2$

Доведення приведено для $n_2 > 0$. При $n_2 = 0$ усе доводиться так само, тільки не потребує введення матриці \widetilde{A}_{ik}^* .

Підмітимо , що елементи матриці \widetilde{A}_{ik}^* залежать від пов'язаної системи координат. Покажу справедливність основного ствердження, незалежного від вибору цієї системи. Необхідною й достатньою умовою такої інваріативності являє собою незалежність $\text{rg}\widetilde{A}_{ik}$ від вибору системи координат. Знайдемо перетворення матриці \widetilde{A}_{ik} при власному обертанні у паралельному переносі системи координат. Загальний вид такого перетворення з системи AZ_k в систему AU_i наступний:

$$g_{Yi} = a_{ik}g_{Zk} + d_i$$

$$|a_{ik}| = 1.$$

Тут g_{Zk} , g_{Yi} - компоненти довільного радіусу-вектору у різних системах координат; a_{ik} -матриця направляючих косинусів осей AU_i відносно AZ_k .

Без посередньої перевіркою можна переконатись у тому , що елементи матриці \widetilde{A}_{ik} при ортогональному перетворенні змінюються по закону

$$\widetilde{A}_{Yik} = B_{ij}^2 B_{jm}^3 \widetilde{A}_{Zmn} B_{nk}^1 \quad (2.2 \text{ X})$$

де B_{jm}^1 - матриця розміром $(n_1 + 3n_2 + 3n_3) \times (n_1 + 3n_2 + 3n_3)$, яку можна уявити у вигляді наступної ключової матриці:

$$B_{jm}^1 = \begin{bmatrix} E & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \Pi_{n_2+n_3} \end{bmatrix} \quad (2.1 \text{ K})$$

де E -одинична матриця розміром $n_1 \times n_1$;

$$\Pi_1 = \Pi_2 = \dots = \Pi_{n_2+n_3} = a_{ik}^T.$$

Матриця B_{ij}^2 розміру $(6 + n_2) \times (6 + n_2)$ має вигляд

$$B_{ij}^2 = \begin{bmatrix} V_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & V_2 & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & E \end{bmatrix} \quad (2.1 \text{ Л})$$

де V_1 , V_2 -матриці розміром 3×3 , співпадаючі з a_{ik} ; E - одинична матриці розміром $n_2 \times n_2$.

Матриця B_{jm}^3 розміру $(6+n_2) \times (6+n_2)$ записується у вигляді

$$B_{jm}^3 = \begin{pmatrix} W & 0 \\ 0 & E \end{pmatrix}, \quad (2.1 M)$$

Де матриця розміром 6×6

$$W = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -d_3 & d_2 & 1 & 0 & 0 \\ d_3 & 0 & -d_1 & 0 & 1 & 0 \\ -d_2 & d_1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad (2.1 H)$$

E -одинична матриця розміром $n_2 \times n_2$.

З матриць (2.2 X)-(2.1 H) видно, що

$$\det B_{ij}^1 = \det B_{ij}^2 = \det B_{ij}^3 = 1$$

Звідси витікає, що ранг матриці при ортогональному перетворенні системи координат не змінюється.

Розглянемо, які поєднання типів рушіїв можуть забезпечити керування по шести ступеням свободи. Для рішення цього питання відмітимо, що рангом матриці є максимальна кількість лінійно незалежних строк та(або) стовпців. Так як ранг $\tilde{A}_{ik} = 6+n_2$, то для таких матриць кількість стовпців, дорівнює $n_1+3n_2+3n_3$, повинно бути не менш числа рядків. Отже, якщо даний рушійний комплекс може одночасно керувати по усім шести степеням свободи, то

$$n_1+3n_2+3n_3 \geq 6+n_2$$

Або

$$n_1 + 2n_2 + 3n_3 \geq 6 \quad (2.1 O)$$

З нерівності (2.1 O) виходить, що для будь якого рушійного комплексу, структура якого задовольняє умові (2.1 O), можливо ввести характерний індекс

$$k_d = n_1 + 2n_2 + 3n_3 - 6$$

Проаналізуємо, чим будуть різнитися рушійні комплекси, що мають нерівні k_d . Нехай $k_d = 0$. Тоді для таких рушійних комплексів, ранг яких рівний $6+n_2$, кількість невідомих T_k у рівняннях (3.30) співпадає з рангом матриці, як відомо з теорії системи лінійних рівнянь, у цьому випадку рішення системи (3.30) єдине, тобто задану керуючу силу й момент даний рушійний комплекс може реалізувати при єдиному розподіленні векторів упорів на рушіях. Будемо називати такі рушійні комплекси не надлишковими.

Нехай $k_d > 0$. З теорії лінійних рівнянь слід, що у цьому випадку ряд значень можна вибрати довільними. Кількість таких T_k дорівнює k_d . Решта T_k число котрих $6 + n_2$, однозначно визначається необхідною керуючою силою F , моментом M й значеннями довільно обраних T_k ? тобто рушійних комплексів з $k_d > 0$ можуть створювати задану керуючу силу і момент не єдиним способом, а k_d виявляє ступінь надлишковості. У зв'язку з цим будемо називати такі рушійні комплекси надлишковими.

Отриманий результат дозволяє провести певну класифікацію рушійних комплексів, здатних одночасно керувати по шести ступеням свободи підводного робота. У якості основи такої класифікації покладемо ступінь надлишковості k_d . Необхідно помітити, що число різноманітних структур рушійного комплексу у кожному з таких класів обмежено.

Кожний рушійний комплекс у даному класі має наступну властивість:

$$n_1 + 2n_2 + 3n_3 = 6 + k_d = N = \text{const.} \quad (2.1 \text{ П})$$

Вираз (2.1 П) є рівняння відносно трьох цілих не негативних чисел n_1, n_2, n_3 .

Максимальна кількість рішень рівняння (2.1 П) може не співпадати з числом різноманітних структур рушійного комплексу у даному класі. Це пов'язано з тим що деякі з них, для яких виконується співвідношення (2.1 П), разом з тим не задовольняють умові (3.31).

Розглянемо клас рушійного комплексу з $k_d = 0$. Дані структури вже знайшли застосування на підводних апаратах та роботах й можуть бути реалізовані на підводних автоматичних роботах. Максимально можливе число таких структур не перевищує семи.

Це витікає з того, що для керування

$$n_1 + 2n_2 + 3n_3 = 6$$

Існує лише сім рішень:

	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7
n_1	6	4	3	2	1	0	0
n_2	0	1	0	2	1	3	0
n_3	0	0	1	0	1	0	2

Покажемо, що на справді таких структур шість, а остання сьома компоновка рушіїв не може задовольняти умові (3.31).

№1 Шість нерухомо закріплених рушіїв.

Матриця \tilde{A}_{ik} для такого рушійного комплексу залишиться у вигляді

$$\left\| \begin{array}{cccccc} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ (l_{21}c_{31}-) & (l_{22}c_{32}-) & (l_{23}c_{33}-) & (l_{24}c_{34}-) & (l_{25}c_{35}-) & (l_{26}c_{36}-) \\ (l_{31}c_{11}-) & (l_{12}c_{32}-) & (l_{13}c_{33}-) & (l_{14}c_{24}-) & (l_{35}c_{15}-) & (l_{36}c_{16}-) \\ (l_{21}c_{11}-) & (l_{22}c_{12}-) & (l_{23}c_{13}-) & (l_{24}c_{34}-) & (l_{25}c_{15}-) & (l_{26}c_{16}-) \end{array} \right\|$$

Для можливості реалізації керування одночасно по шести ступеням свободи рушії повинні бути розташовані таким чином , щоб

$$\det \tilde{A}_{ik} \neq 0$$

Така компоновка – одна з найочевидніших . загальна кількість рушіїв у ній максимально. Найбільш просто реалізувати систему керування, якщо кожна пара рушіїв встановлена навколо однієї зі зв'язаних осей робота

№2 Чотири нерухомо закріплених рушіїв і один поворотний. Матриця \tilde{A}_{ik} для такої структури має вигляд

$$\left\| \begin{array}{ccccccc} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & 1 & 0 & 0 \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & 0 & 1 & 0 \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & 0 & 0 & 1 \\ l_{21}c_{31}) & l_{32}c_{12}) & l_{31}c_{12}-) & l_{13}c_{23}-) & l_{35} & 0 & l_{25} \\ l_{12}c_{32}-) & l_{12}c_{23}-) & l_{23}c_{12}) & l_{12}c_{23}-) & l_{25} & l_{15} & 0 \\ l_{12}c_{31}) & l_{32}c_{13}) & l_{23}c_{12}-) & l_{12}c_{21}-) & l_{31} & l_{21} & l_{15} \end{array} \right\|$$

Однією з найпростіших компоновок є наступна: два нерухомо закріплених рушія розташовані симетрично на носу й на кормі та направлені вертикально догори; два нерухомих лагових рушія також встановлені на носу й кормі; поворотний рушій закріплений на кормі й обертається у горизонтальній

площині. Загальна кількість рушії у порівнянні з попередньою компоновкою зменшиться. Аналогічна компоновка використана у підводному апараті DSRV, однак з просторово-кормовим рушієм.

№3 Три нерухомо закріплених рушія й один просторовий.

Для цього випадку матриця \tilde{A}_{ik} приймає наступну форму:

$$\left\| \begin{array}{cccccc} c_{11} & c_{12} & c_{12} & 1 & 0 & 0 \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & 0 & 1 & 0 \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & 0 & 0 & 1 \\ l_{21}c_{31}- & l_{12}c_{32}- & l_{12}c_{32}- & 0 & -l_{34} & l_{24} \\ l_{23}c_{13}- & l_{23}c_{21}- & l_{22}c_{23}- & -l_{34} & 0 & -l_{14} \\ l_{12}c_{13}- & l_{23}c_{12}- & l_{33}c_{31}- & l_{24} & l_{14} & 0 \end{array} \right\|$$

Найбільш проста компоновка: два вертикальних нерухомих рушія на кормі та на носу; один лаговий нерухомий рушій на носу й просторовий рушій на кормі. На сьогоднішній день така структура рушійного комплексу на підводних апаратах та роботах не використовується.

№4 два нерухомих закріплених рушія та два поворотних. Матриця \tilde{A}_{ik} для цього випадку приведена нижче:

$$\left\| \begin{array}{ccccccccc} c_{11} & c_{12} & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ c_{21} & c_{22} & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ c_{31} & c_{23} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ l_{31}c_{21} & l_{22}c_{31}- & 0 & l_{23} & l_{14} & l_{34} & l_{24} & l_{33} \\ l_{11}c_{31}- & l_{33}c_{21} & l_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ l_{21}c_{11} & l_{22}c_{12}- & l_{23} & l_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_{11} & r_{21} & r_{31} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{31} & r_{12} & r_{32} \end{array} \right\|$$

Можлива компоновка: два поворотних у вертикальній площині рушія розташовані з лівого і правого борту; один нерухомий ходовий-у кормі та один нерухомий лагів-на носі робота. Інша компоновка для допоміжних рушіїв використана у жилому апараті DEEP STAR(США): дві поворотні водометні трубки розташовані у носовій частині та дві нерухомі водометні-по бортам.

№5 Нерухомо закріплений рушій, поворотний та просторовий. Матриця \tilde{A}_{ik} для такої компоновки буде наступною.

$$\begin{vmatrix} c_{11} & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ c_{21} & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ c_{31} & 0 & l_{22} & l_{23} & 0 & l_{33} \\ l_{21}c_{31} & l_{31} & 0 & 0 & l_{11} & l_{13} \\ l_{11}c_{32} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ l_{13}c_{21} & l_{32} & l_{12} & l_{21} & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Можлива компоновка: вертикальний рушій , нерушимо закріплений , розташований на носу робота, просторовий – на кормі поворотний у горизонтальній площині рушій у верхній частині підводного робота. На сьогоднішній день такі структури не знайшли застосування у підводних апаратах. Це можна пояснити тим, що окрім складності керування важко конструктивно розмістити настільки різнотипні рушії та приводи.

№6 Три поворотних рушія. Така структура виявляє матрицю \tilde{A}_{ik} вигляду

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -l_{31} & l_{32} & l_{12} & l_{13} & l_{22} & 0 & -l_{33} & l_{23} \\ l_{22} & 0 & -l_{11} & -l_{13} & 0 & l_{23} & l_{32} & 0 & -l_{13} \\ -l_{12} & l_{11} & 0 & l_{21} & -l_{13} & 0 & l_{33} & l_{13} & 0 \\ r_{11} & r_{21} & r_{31} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_{12} & r_{22} & r_{32} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{13} & r_{23} & r_{33} \end{vmatrix}$$

Подібний рушійний комплекс використовували на підводному апараті GSV-1. Для підводних робіт така структура вперше була запропонована у монографіях (3.60). В даній структурі значно зменшилася загальна кількість рушіїв. Конструктивно їх більш зручно розташувати на роботі.

№7 Два просторових рушія.

Така структура , хоча й задовольняє умовам (2.1 П) , однак одночасне керування по всім шести ступеням свободи забезпечити не може. Це пояснюється тим, що для будь якої компоновки рушіїв не виконується умова (3.31). для того щоб це довести , достатньо перевірити , що визначник матриці

$$\left\| \begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -l_{31} & l_{21} & 0 & -l_{32} & l_{22} \\ l_{31} & 0 & l_{11} & l_{32} & 0 & -l_{12} \\ -l_{21} & l_{11} & 0 & -l_{22} & l_{12} & 0 \end{array} \right\|$$

завжди дорівнює нулю. Фізично це можна пояснити наступним. Для будь якої компоновки рушіїв завжди можна обрати пов'язану систему координат, одна з осей якої проходить крізь обидва рушія. Керуючий компонент уздовж цієї осі від таких рушіїв завжди рівний нулю.

Таким чином, розібрані шість структур вичерпують усі можливі рушійні комплекси для підводних роботів без рушійної збитковості. Аналогічно можливо виявити усі рушійні комплекси зі ступеню збитковості 1,2 та т.д.

2.2 Розробка алгоритмів керування удосконаленою робото технічною платформою

Вибір методу та апаратури виявлення перешкод

Окрім виконання основної задачі, робот повинен забезпечити свою безпеку. Небезпечні ситуації можуть виникати внаслідок внутрішніх несправностей або через зіткнення зі дном. Розглянемо метод виявлення перешкод. Виявлення перешкод будемо проводити методом поверхонь безпеки, запропонованим у монографіях. Застосування цього методу забезпечує виявлення і обхід перешкод підводним фотороботом. Крім того при відповідному виборі форми поверхні обсяг обчислень необхідний для обробки інформації зводиться до мінімуму.

Оточимо робот уявною поверхнею, форма якої в зв'язаній системі координат може залежати від швидкості апарату. Загальне рівняння цієї поверхні зображеної на Рис 2.4, ум пов'язаній системі координат має вигляд

$$f_1(g_1, g_2, g_3, v) = 0 \quad (2.2.1)$$

де g_1 - g_3 - координати точок поверхні; v – швидкість робота.

Обстановка вважається небезпечною якщо перешкода потрапляє всередину обсягу обмеженого поверхнею (2.2.1). Тому вона повинна бути обрана так щоб робот встигав зробити маневр обходу при настанні небезпечної обстановки. При русі підводного апарату вираз (2.2.1) визначає своєрідний коридор в якому робот може безпечно виконувати основне завдання.

Класифікація перешкоди визначається за знаком лівої частини рівняння (2.2.1), де замість g_1 - g_3 необхідно поставити координати точок перешкоди. Якщо для будь-якої точки перешкоди ліва частина рівняння (2.2.1) більше нуля, то обстановка безпечна, а якщо якась ділянка потрапила всередину поверхні, то обстановка небезпечна і необхідно починати маневр обходу.

Вимірювання вектора швидкості робота v необхідно проводити відносно нерухомої системи координат, що технічно складно. Помилки ж у вимірі можуть призвести до зіткнення робота з перешкодою. Для спрощення можна задатися поверхнею виду

$$f_1(g_1, g_2, g_3) = 0 \quad (2.2.2)$$

яка вибирається таким чином, щоб у діапазоні зміни робочих швидкостей підводного фоторобота він завжди встигає зробити маневр переходу на обхід, не врізаючись в перешкоду. Тим самим поверхню (2.10) буде свідомо більше тієї, що представлена рівнянням (2.2.1). Явний вигляд поверхні (2.10) визначається формою підводного фоторобота діапазону робочих швидкостей і максимальними упорами рушіїв.

Вимірювання відстані в воді на підводних апаратах і роботах здійснюється акустичними гідролокаторами. Для вимірювання положення безперервної поверхні виду (2.2.1) і (2.2.2) щодо дна необхідно кілька гідролокатора зі скануючою діаграмою спрямованості. Обробка інформації зводиться до того що виміряна в заданому напрямку відстань до дна порівнюється з положенням точки поверхні безпеки в цьому напрямку. Небезпека обстановки визначається за знаком мінімальний різниці між відстанями до дна і до відповідних точок поверхні безпеки.

(МА) Однак обсяг необхідної інформації залишається досить великим. Тому виберемо розривну поверхню безпеки, що складається з трьох окремих ділянок (рис, 2.5): : одної передньої та двох бічних. Відповідно всі перепони будуть належати до трьох класів: передні .ліві та праві. При цьому найбільшу небезпеку для робота складають перепони попереду. Оберемо систему

гідролокаторів з трьох похилих та одного направлено до низу ехолота. Додатковий ехолот знизу може бути доданий визначення нахилу дна. Передній гідролокатор буде забезпечувати стеження за положенням передньої поверхні безпеки відносно перепон, а бокові – за положенням лівої та правої поверхонь. Ехолот знизу буде відстежувати відстань до дна.

Таким чином, загальний характер руху робота повинен виглядати наступним чином. Підводний фоторобот виконує режим стеження за рельєфом дна при деякому алгоритмі руху у горизонтальній площині доки ні одна з поверхонь безпеки не наткнеться на перешкоду. Як тільки це станеться, обставини вважаються небезпечними та підводний фоторобот переключасться у режим обходу перешкоди. Визначення небезпечної ситуації залежить від розмірів поверхонь безпеки та їх положення відносно робота. Для підводних роботів різної форми з різним діапазоном робочих швидкостей параметри поверхонь безпеки не будуть однаковими. Необхідні розміри поверхонь безпеки можна оцінити наступним чином. Вертикальний розмір передньої поверхні безпеки оберемо такого ж порядку, що і вертикальний розмір робота. А горизонтальний розмір бокових поверхонь безпеки – порядку довжини робота. Таким чином також забезпечується коридор, вільний від перешкод який відповідає розмірам робота. Відстань від передньої поверхні R_1 повинна бути не менше шляху гальмування. Форму ділянок поверхні для скорочення об'єму переробки інформації краще обрати сферичну з центром (точка В), розташованим на підводному роботі. В це місце і встановлюється відповідний гідролокатор. Тоді кожна з поверхонь у пов'язаній системі координат задається наступним чином:

Координатами центра В у пов'язаній системі координат;

Вертикальним (φ_1) та горизонтальним (φ_2) кутовими розмірами поверхні;

Кутом нахилу (α) до горизонту лінії, що поєднує середню точку кожної з поверхонь з місцем знаходження гідролокатора;

Відстояння поверхні R_i ($i = 1, 2, 3$), де R_2, R_2, R_3 – відстояння передньої, лівої та правої поверхонь безпеки відповідно.

Кути φ_1 й φ_2 задають область сканування відповідного гідролокатора. Для обраної сферичної форми поверхонь можливо використовувати гідролокатори з нерухомою, але широкою діаграмою направленості. Для переднього гідролокатора тоді вертикальний кут розкриття основного

пелюстки діаграми направленості має дорівнювати φ_1 . Для бокових локаторів горизонтальне розкриття повинне дорівнювати φ_2 . При цьому необхідно враховувати, що поверхня безпеки повинна знаходитися у дальній для відповідного гідролокатора зоні, де має сенс поняття діаграми направленості. Така умова накладає обмеження на розмір випромінювача та робочу частоту.

Розглянемо процес вимірювання та обробки інформації для системи що розглядається при визначенні взаємного положення поверхні безпеки та перешкоди. Передній фронт відбитого акустичного сигналу поступає до приймача від найближчої озвученої точки дна . оберемо рівень порогу детектування у приймачі так, щоб рівень сигналу від бокових пелюсток антени знаходився б нижче цього порогового значення. Тоді момент приходу луна- сигналу відповіді визначає відстань до найближчої точки дна в межах основної пелюстки діаграми направленості. Знак різниці між цією відстанню та від стоянням поверхні безпеки визначає безпеку обстановки. Якщо знак різниці позитивний, тоді перешкода лежить за поверхнею і вона безпечна. Відповідно якщо знак від'ємний – обстановка небезпечна. Таким чином ,обробка інформації зводиться до мінімуму. При цьому зменшується час вимірювання, відносно випадку де використовується скануючий гідролокатор.

Розглянемо принцип вибору от стояння передньої поверхні безпеки від робота . Як ми вже казали , це відстань , на якому робот може виконувати маневр обходу, не врізаючись у дно. Верхньою оцінкою такої відстані є шлях що робот проходить після відключення двигунів на максимальній швидкості апарата. При маневрі обходу після виявлення перешкоди горизонтальні рушії гасят швидкість робота. В наслідок цього гальмівний шлях зменшується та верхня оцінка гальмівного шляху ,що використовується в роботі, гарантує від зіткнень.

Експериментальне визначення гальмівного шляху робота з рушійним комплексом не викликає складностей. При роботі на складних рельєфах ця відстань буде в значній мірі визначати траєкторію руху апарата. Чим більше гальмівний шлях, тим менша відстань буде пройдена у основному режимі.

Таким чином, гальмівний шлях (безпечна відстань) характеризує ефективність використання підводного фоторобота на складному рельєфі. Змінити цей параметр для вже виготовленого апарата можливо шляхом зменшення робочої швидкості або за рахунок конструктивної модернізації.

Обидва шляхи не бажані. Тому потрібен теоретичний, експериментальний та статистичний підходи до проектування робота з заданим гальмівним шляхом.

Під статистичним підходом розуміється статистика вимірів цієї величини для апаратів аналогічних конструкцій. При експериментальному визначенні вимірюються відстань та час до зупинки апарата після виключення рушіїв та включення їх на реверс. Перша відстань дає оцінку зверху, а друга – знизу.

Режим обходу у вертикальній площині

Ми розглянули алгоритми виявлення перешкод. Тепер розглянемо безпосередньо маневр обходу після виявлення перешкоди.

В алгоритмі обходу при використанні безперервних поверхонь ця поверхня повинна сковзати по перешкоді. Розглянемо випадок попадання перешкоди на передню поверхню безпеки. (мал.2.6). Підводний фоторобот може здійснювати обхід перешкоди у вертикальній або горизонтальній площині, а також по просторовій траєкторії. Обхід у горизонтальній площині можливо здійснити без порушення основного режиму. Але в цьому випадку буде відбуватися ухід з обраного галса. Крім того, з точки зору геофізичних досліджень цікаве дослідження вершини перешкоди, яка при горизонтальному обході не буде сфотографована. Тому оберемо такий алгоритм обходу передньої перешкоди, при якому передня поверхня безпеки ковзає по перешкоді, а підводний фоторобот рухається у вертикальній площині. Позначимо координати переднього гідролокатора у зв'язаній системі координат через (z_{1F}, z_{2F}, z_{3F}) . Тоді алгоритм обходу запишемо наступним чином:

$$(S_1 + z_{1F} - y_1) + (S_2 + z_{2F} + y_2) + (S_3 + z_{3F} + y_3) - R_1^2 = 0, \quad (2.11)$$

Де $y_1 - y_3$ -координати найближчої до гідролокатора точки дна в межах основної пелюстки діаграми направленості. Позначимо відстань до найближчої точки через R --. Тоді умова (2.11) запишеться у вигляді

$$R_F - R_1 = 0 \quad (2.12)$$

Тут

$$R_F = 1/2 c \Delta T_{\min}$$

Де ΔT_{\min} - виміряний мінімальний час затримки луна-сигналу відповіді

При обході підводний фоторобот стабілізується по кутам крена та дифферента. Кут курсу є стабілізованим, якщо робот рухається на визначеному галсі, або змінюється відповідно до з обраним алгоритмом руху у горизонтальній площині. Для повного опису алгоритму обходу задамо швидкість руху робота. Керуючий сигнал у горизонтальному каналі системи управління виробляється в залежності від помилки між виміряною відстанню R_G та необхідним R_1 . тому необхідно керувати вертикальною складовою швидкості. Легше за все реалізувати закон керування, коли

$$v_1 = v = \text{const}$$

Якщо результати вимірів нахилу вводяться у систему керування, то можна обрати програму для v_1 таким чином, щоби модуль швидкості був постійним у вертикальній площині: $|v| = \text{const}$. Тоді

$$v_1 = v \operatorname{tg} \alpha / \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha} \quad (2.13)$$

До точності витримки основної умови (2.11) при обході витримуються менш жорсткі вимоги, ніж при вертикальному відстеженні дна. Це пояснюється тим, що при обході у вертикальній площині, якщо зьомка і відбувається, то з різних відстоянь від ґрунту. Тому перевагою використання програми (2.13) є те, що при зменшенні нахилу перешкоди вертикальна швидкість обходу також зменшується. Це призводить до більш плавного переходу до режиму відстежування.

Розглянемо подальшу поведінку підводного фоторобота при вертикальному обході в залежності від рельєфу дна. Якщо перешкода має форму різкого підйому, який переходить у рівну поверхню – сходи́нка

(мал.5,а), то вертикальна відстань до дна по нижньому ехолоту буде спочатку зростати, а потім почне зменшуватися. Коли відстань до дна по нижньому ехолоту стане менше R_0 , підводний фоторобот перейде в режим стеження. Але треба зазначити, що з початку обходу в залежності від знаку вертикальної складової швидкості відстань до дна за короткий інтервал часу може стати менше R_0 . Це відбувається в інтервалі часу, що відповідає перехідному процесу з відстеження на обхід. Щоб не допустити багаторазових невиправданих переключень на початку обходу вертикальна відстань R'_0 , яка визначає перехід з обходу на стеження, обирається дещо меншим, ніж R_0 . Різниця $(R_0 - R'_0)$ відповідає можливому вертикальному проскакуванню підводного фоторобота вниз при переході на обхід.

Позначимо поточні покази нижнього ехолота через R_B . Тоді умова переходу на стеження запишеться у вигляді

$$R_B < R'_0$$

На Рис (5 а) надані результати моделювання у випадку коли рух відбувається за схемою: стеження-обхід-стеження . Через те що моделювалася тільки кінематика програмного руху, то перехідні процеси не враховувалися та приймалося $R_0 = R'_0$ Обхід починається в точці 1 (див. мал. 5а), коли

$$R_F < R_1,$$

Та закінчується у точці 2, коли

$$R_F < R_1$$

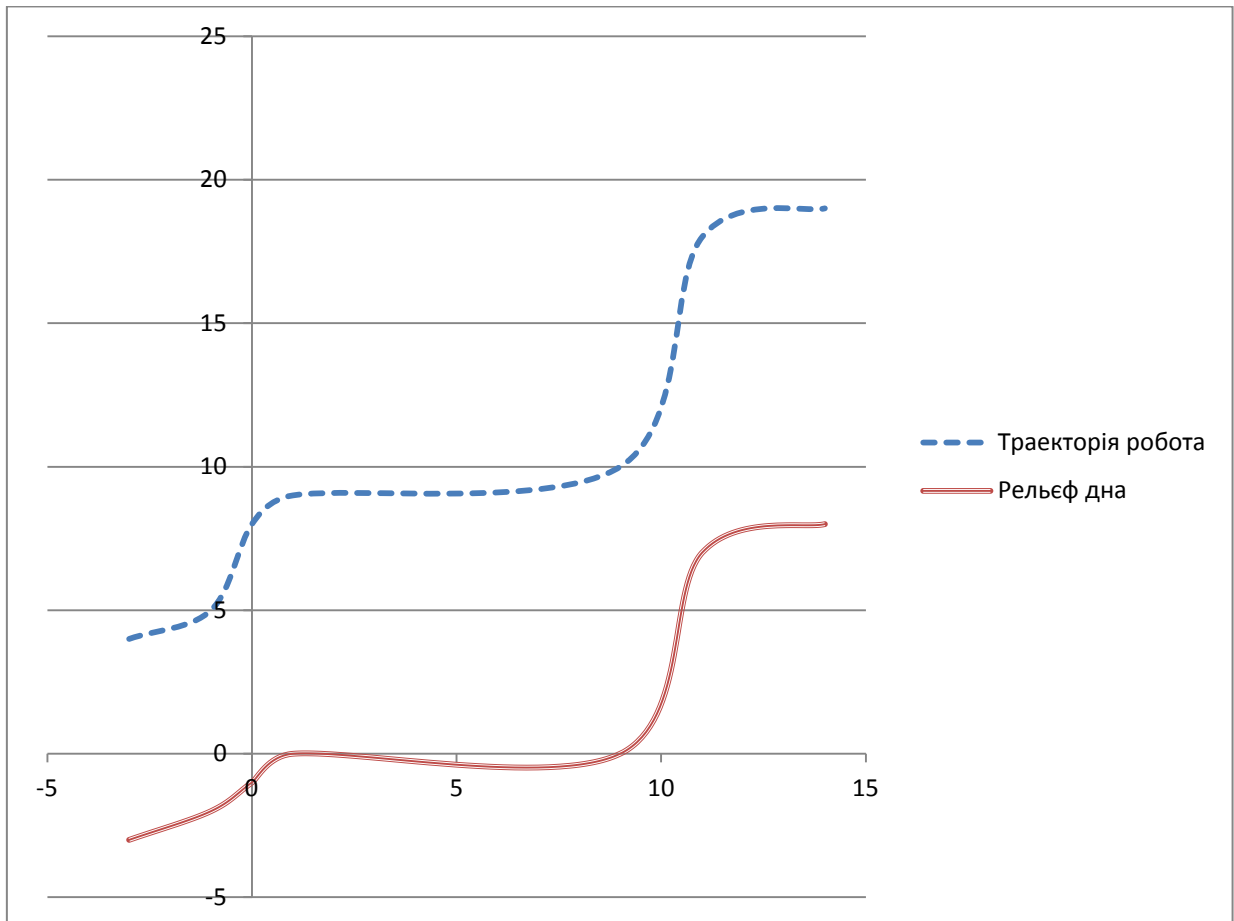


Рисунок (4) вертикальний обхід перешкод у вигляді сходинок

Тепер розглянемо перешкоду у формі різкого пику (мал. 5)

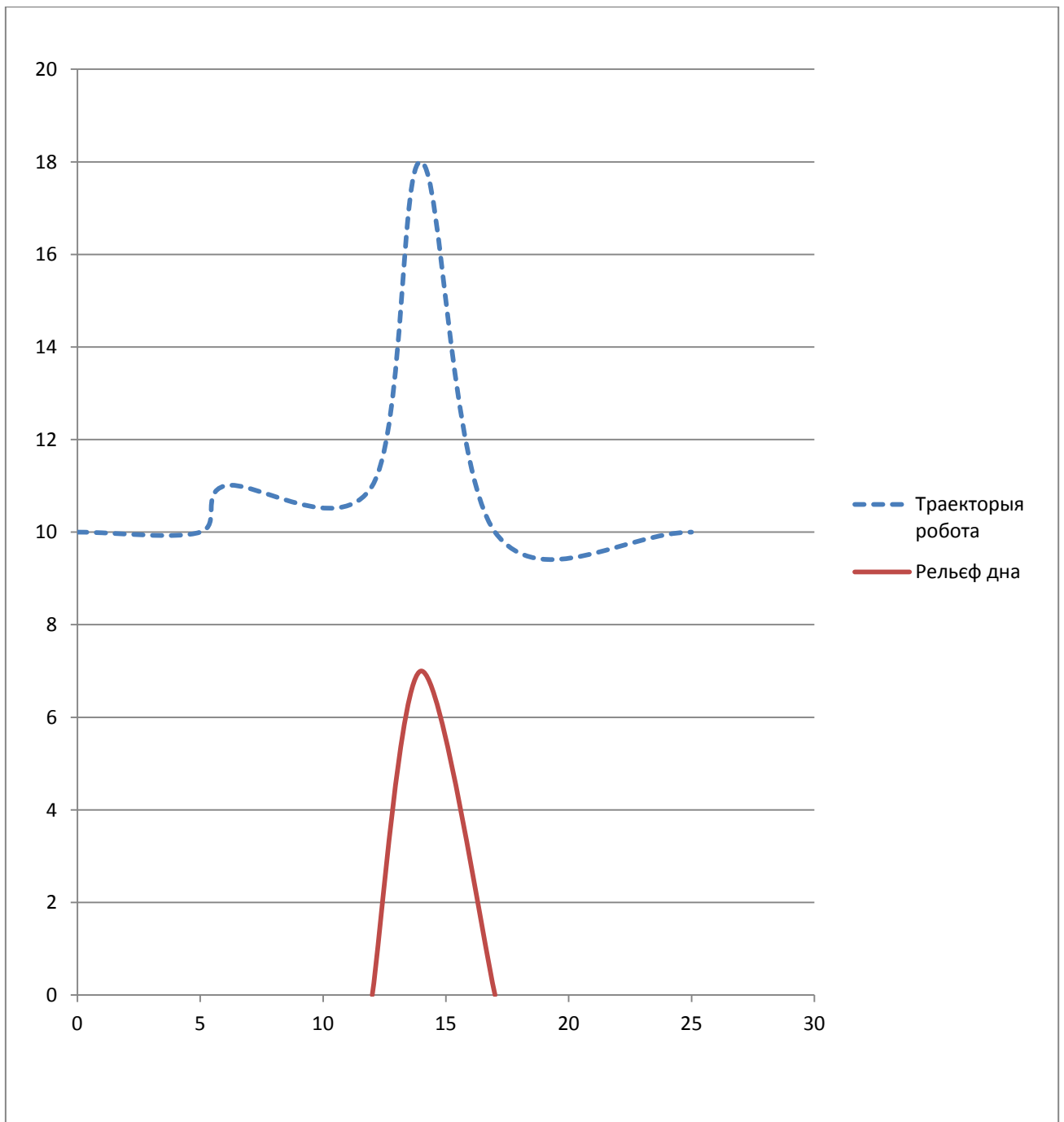


Рисунок (5) вертикальний обхід перешкод у вигляді піки

У цьому випадку передній гідролокатор може “втратити” перешкоду за двох обставин: по перше , через кінцевість ширини діаграми направленості , коли гідролокатор направлений повз верхівку; по-друге при великих кутах між віссю максимальною чутливістю прийомо-випромінюючої антени та нормалью до поверхні в данному місці рівень розсіюваного сигналу у напрямку прийомної антени може бути малим. Сигнал на вході приймача визначається індикатрисою розсіювання даного ґрунта на даній частоті, а

також діаграмою направленості антени. Така втрата буде характеризуватися або різким стрибком у показках локатора , або повною відсутністю луна-сигналу відповіді.

Для відстані від дна до 10 м було проведено експериментальне визначення рівня та форми луна-сигналу відповіді в залежності від типу ґрунта та кута нахилу антени.

Умови по яким робот відрізняє відсутність перешкоди можна обрати у вигляді $R_F > R_{Fmax}$

де $R_{Fmax} = 1/2 \cdot c \cdot \Delta T_{max} > R_1$;

ΔT_{max} максимальний час очікування луна-сигналу відповіді

При втраті перешкоди відстань до дна більше R_0

Якщо відразу розпочати спуск до відстані стеження , то підводний фоторобот може зіткнутися з піком перешкоди, який тепер не знаходиться в зоні бачення переднього гідролокатора. Тому необхідно ввести проміжний режим руху на постійній глибині, яка дорівнює поточній. Якщо перешкода дійсно має форму різкого піку , а апарат за цей час не було знесено у бік , то відстань до дна під час підходу до піку буде зменшуватися та стане менше R_0 . В цей момент робот перейде на режим стеження, тобто

$$R_B < R_0$$

Якщо робота за час руху на постійній глибині було знесено у бік від перешкоди або сигнал про виявлення перешкоди та його втрата були хибним, то умова (2.14) може не виконуватися. Щоб врахувати цей випадок , оцінимо час , який потрібен роботу, щоб дійти до вершини піку у режимі постійної глибини. Відстань до піку порядку R_1 , а горизонтальна швидкість підводного робота v . Тому час руху до верхівки піка:

$$\tau_p \approx R_1/v$$

Нехай максимальний час руху в режимі постійної глибини приблизно дорівнює часу руху до верхівки піку:

$$\tau_{max} \approx \tau_p$$

Тоді, якщо час руху в режимі постійної глибини більше τ_{max} ,

А умова (2.14) не була виконана, то робот переходить у режим стеження. Таким чином , можна записати другу умову переходу з режима постійної глибини на стеження у вигляді

$$\Delta\tau > \tau_{max}$$

З режима постійної глибини підводний фоторобот перейде на обхід, якщо буде виконана умова (2.12). На мал. 5 точка 1 – початок обходу, у точці 2 робот втрачає перешкоду та йде в режимі постійної глибини, в точці 3 віконується умова (2.14) и апарат переходить на стеження.

Таким чином, для обходу у вертикальній площині передніх перешкод достатньо двох режимів: обходу та постійної глибини.

2.3 Моделювання процесу функціонування удосконаленої системи керування

Розглянемо траєкторію АПРА , повертаючи з певною точністю профіль рельєфу дна. В кожній точці такої траєкторії можна визначити дві величини: уклон $W=tga$ та радіус кривизни траєкторії R . Як відомо , радіус кривизни траєкторії у даній точці пов'язаний з параметрами W і P наступним чином:

$$R = (1 + W^2)^{3/2}/P \quad (4.16)$$

Тоді, як виходить з параграфу 4.2 мінімальне значення R в даній точці траєкторії обмежено та залежить від місцевого нахилу. Нехай траєкторії мають максимальне та мінімальне значення нахилів , не перевищуючих значення a_{max} :

$$|a| \leq a_{max} \leq \pi/2 .$$

З цього класу траєкторій АПРА може пройти по заданій швидкості не по всім , а тільки по тим траєкторіям, радіус кривизни яких лежить у визначених діапазонах, визначених динамічними можливостями робота. При заданому a для випуклих траєкторій цей радіус не менше $R^+(a) > 0$, для увігнутих - не більше $R^-(a) < 0$.

Будемо характеризувати керованість робота в вертикальній площині двома величинами:

$$R^+ = \max R^+(a) > 0,$$

$$R^- = \min R^-(a) < 0.$$

Розглянемо плюси даного критерію стосовно до підводних роботів. У режимі відстеження даних величина визначає радіус нерівностей дна, які може відстежувати підводний робот. Вочевидь що чим менше радіус кривизни даної траєкторії підводного робота, тим більш він маневрений у вертикальній площині. Радіус нерівностей дна є величина що використовується у гідроакустиці (розділ з гідроакустики) й прийнята в океанологічній практиці. У ряду різних критеріїв, які використовуються при створенні підводних роботів, таких як критерій по глибині занурення, енергоспоживанню, автономності, даний відображає специфіку основного режиму роботи підводного робота.

Для загальності результатів розглянемо безрозмірний радіус

$$\bar{R}^+ = R^+/2a, \bar{R}^- = R^-/2a,$$

де $2a$ – довжина робота, тобто можна порівняти радіус кривизни з довжиною робота. Тоді, як слід з рівняння динаміки підводного робота й теорії розмірності, величини \bar{R}^+ та \bar{R}^- залежать від наступних безрозмірних параметрів:

$$P_{1\max} = 2 T_{z1\max} / F_0, P_\epsilon = 2 b/2a$$

$$P_{1\min} = 2 T_{z1\min} / F_0, P_m = m/pV \quad (4.17)$$

$$P_{3\max} = 2 T_{z3\max} / F_0, P_G = G/F_0$$

$$P_{3\min} = 2 T_{z3\min} / F_0, Re = 2 a\vartheta/v$$

$$P_0 = 2 a/d, \quad a_{\max}$$

де $F_0 = \rho v^2 S/2$; v – кінематична в'язкість води.

Залежність від безрозмірних параметрів дозволяє виявити закономірності змін керованості робота в найбільш загальному вигляді.

Розберемо фізичний смисл безрозмірних параметрів у співвідношеннях (4.17): $P_{1\max}$, $P_{1\min}$, $P_{3\max}$, $P_{3\min}$ – відношення екстремальних упорів рушіїв до сили опору тіла, поперечна площа якого якого дорівнює площі робота, з одиничним коефіцієнтом опору;

P_0 виявляє компоновку вертикальних рушіїв;

Π_{ϵ} - подовження робота (від Π_{ϵ} залежать коефіцієнти сил та моментів опору робота, а також коефіцієнти поєднаних мас);

Π_m - відношення середньої щільності робота до щільності води;

Π_G – безрозмірна сила остаточної плавучості;

a_{max} виявляє кордони досліджуємого класу траєкторій підводного робота. (Найбільш широкий клас траєкторій виявляється $a_{max} = 90^\circ$, у цьому випадку до керованості підводного робота пред’являються найбільш жорсткі потреби).

Як було показано у параграфі (4.2) , реалізація руху по траєкторіям з $a_{max} = 90^\circ$ можлива, якщо , якщо використовується керування горизонтальною складовою швидкості підводного робота в залежності від нахилу дна, а а рушії здатні розвивати упори , які визначаються співвідношеннями(4.13). Будемо розглядати керованість тільки таких роботів.

Тоді для отримання залежностей керованості підводного робота від обраних безрозмірних параметрів вирішимо систему(4.9)-(4.12),(4.16),(4.17). Після приведення до безрозмірного вигляду отримаємо наступні співвідношення між керованістю й безрозмірними параметрами:

$$\bar{R}^+ = \max (\bar{R}_I^+, \bar{R}_{II}^+),$$

$$\bar{R}^- = \min (\bar{R}_I^-, \bar{R}_{II}^-),$$

де

$$\bar{R}_I^+ = \max [\bar{R}^+(a), \bar{R}^+(a), \bar{R}^+(a)]$$

$$\bar{R}_{II}^+ = \max [\bar{R}^-(a), \bar{R}^-(a), \bar{R}^-(a)]$$

$$\bar{R}_I^- = \min [\bar{R}^+(a), \bar{R}^+(a), \bar{R}^+(a)]$$

$$\bar{R}_{II}^- = \min [\bar{R}^-(a), \bar{R}^-(a), \bar{R}^-(a)]$$

$$\bar{R}_{1min}^+ = 4/3 \frac{(\Pi_m + k_1) \cos a}{[\Pi_{1max} + G + c_{Z1Z}(a)]},$$

$$\bar{R}_{2min}^+ = 4/3 \frac{(\Pi_m + k_1) \cos a}{[\Pi_{1max} + \Pi_G + c_{Z1}(a)]}$$

$$\bar{R}_{3min}^+ = 4/3 \frac{(\Pi_m + k_1) \sin a}{[\Pi_{3min} + c_{Z3}(a)]},$$

$$\begin{aligned}
\bar{R}_{1min}^- &= \bar{R}_{1min}^+ , \\
\bar{R}_{2min}^- &= \bar{R}_{2min}^+ , \\
\bar{R}_{3min}^- &= -4/3 \frac{(\Pi_m + k_3) \sin a}{[\Pi_{3max} + c_{Z3}(a)]} \\
\bar{R}_{1max}^+ &= 4/3 \frac{(\Pi_m + k_1) \cos a}{[\Pi_{1min} + \Pi_G + c_{Z1}(a)]} \\
\bar{R}_{2max}^+ &= 4/3 \frac{(\Pi_m + k_1) \cos a}{[\Pi_{1min} + \Pi_G + c_{Z1}(a)]} \\
\bar{R}_{3max}^+ &= -4/3 \frac{(\Pi_m + k_3) \sin a}{[\Pi_{3max} + c_{Z3}(a)]} \\
\bar{R}_{1max}^- &= \bar{R}_{1max}^+ ; \bar{R}_{2max}^- = \bar{R}_{2max}^+ , \\
\bar{R}_{3max}^- &= -4/3 \frac{(\Pi_m + k_3) \sin a}{[\Pi_{3min} + c_{Z3}(a)]}
\end{aligned} \tag{4.18}$$

У виразах(4.31) використані наступні позначення:

$$k_1 = \lambda_{11}/pV, k_3 = \lambda_{33}/pV ,$$

$$c'_{Z1} = c_{Z1} - 4/3 \Pi_0 m_{Z2}$$

$$c''_{Z1} = c_{Z1} - 4/3 \Pi_0 m_{Z2}$$

Формули (4.18) значно спрощені для підводного робота сферичної форми. Якщо $a_{max} = 90^\circ$, тоді максимум та мінімум що входять в співвідношення (4.18) знаходяться за допомогою відомих методів визначення екстремуму функції , заданої аналітично. Тоді для сферичного підводного робота керованість на класі траєкторій з $a_{max} = 90^\circ$ визначається наступними величинами:

$$\bar{R}^+ = 4/3 (\Pi_m + 0,5) \max [1/\sqrt{(\Pi_{1max} + \Pi_G)^2 - c_0^2} ;$$

$$1/|\Pi_{3min}| ; 1/\sqrt{\Pi_{3max}^2 - c_0^2}],$$

$$\bar{R}^- = -4/3 (\Pi_m + 0,5) \min [1/\sqrt{(\Pi_{1min} + \Pi_G)^2 - c_0^2} ;$$

$$1/|P_{3min}|; 1/\sqrt{P_{3min}^2 - c_0^2}].$$

Для сферичного підводного робота, як слід зі співвідношень (4.14), упори горизонтальних та вертикальних рушіїв слід обрати приблизно однаковими при нульовій плавучості. Якщо

$$P_{1max} = P_{3max} = -P_{min} = -P_{3min} = P,$$

$$\text{То для } P_G = 0, P_m = 1 \quad (4.19)$$

$$\bar{R}^+ = -\bar{R}^- = 2/\sqrt{P^2 - c_0^2}.$$

Формула (4.19) може бути напряду використана для інженерних розрахунків, якщо робот має форму близьку до сферичної.

Для того щоб такий робот мав на швидкості v радіус розвороту у вертикальній площині, рівний R , необхідно вибрати упор горизонтальних та вертикальних рушіїв наступним чином:

$$F = 2T = \frac{pSv^2}{2} \sqrt{c_0^2 + 4L^2/R^2}, \quad (4.20)$$

де L – максимальний розмір робота. При використанні звичайної методики ці упори обираються за формулою

$$F = \frac{pSv^2}{2} c_0. \quad (4.21)$$

З порівняння виразів (4.20) та (4.21) видно, що для маневрування роботу необхідно більше керуючої сили, ніж для прямолінійного руху. Визначимо наскільки необхідно знизити максимально можливу швидкість робота сферичної форми, якщо він повинен мати безрозмірний радіус маневрування \bar{R} . При максимальній швидкості прямолінійного руху.

$$F = \frac{pSv_{max}^2}{2} c_0. \quad (4.22)$$

З виразу (4.20), (4.22) слід що

$$v = v_{max} / \sqrt[4]{1 + 4/(c_0 \bar{R})^2}.$$

Таким чином, запропонований метод може бути використаний у двох випадках. По перше, коли необхідно спроектувати робота з заданою керованістю на заданій швидкості, а по друге, коли для виготовлення робота

треба визначити швидкість робочого руху , при якому досягається необхідна керованість.

Для підводного робота , маючого форму еліпсоїда обертання $b/a = 0.47$ розрахунок залежності маневреності від безрозмірних параметрів проводився чисельно на ЕОМ по формулам (4.18) й коефіцієнтам опору, отриманим в роботі .

На Рис 6 а показані ці залежності для $\alpha_{\max} = 90^\circ$ та рівних горизонтальних й вертикальних упорів. Керованість сферичного підводного робота завжди вище , ніж у еліпсоїдального. Це пояснюється тим , що хоча при $\alpha = 0^\circ$ коефіцієнт опору еліпсоїда приблизно в 2,5 рази менше, ніж у сфери, але при $\alpha = 90^\circ$ спостерігається зворотне співвідношення. При цьому опір еліпсоїда у чотири рази більше, ніж у сфери. Окрім того , коефіцієнт поєднаної маси по вертикальній осі у еліпсоїда примірно у два рази вищий , ніж у сфери.

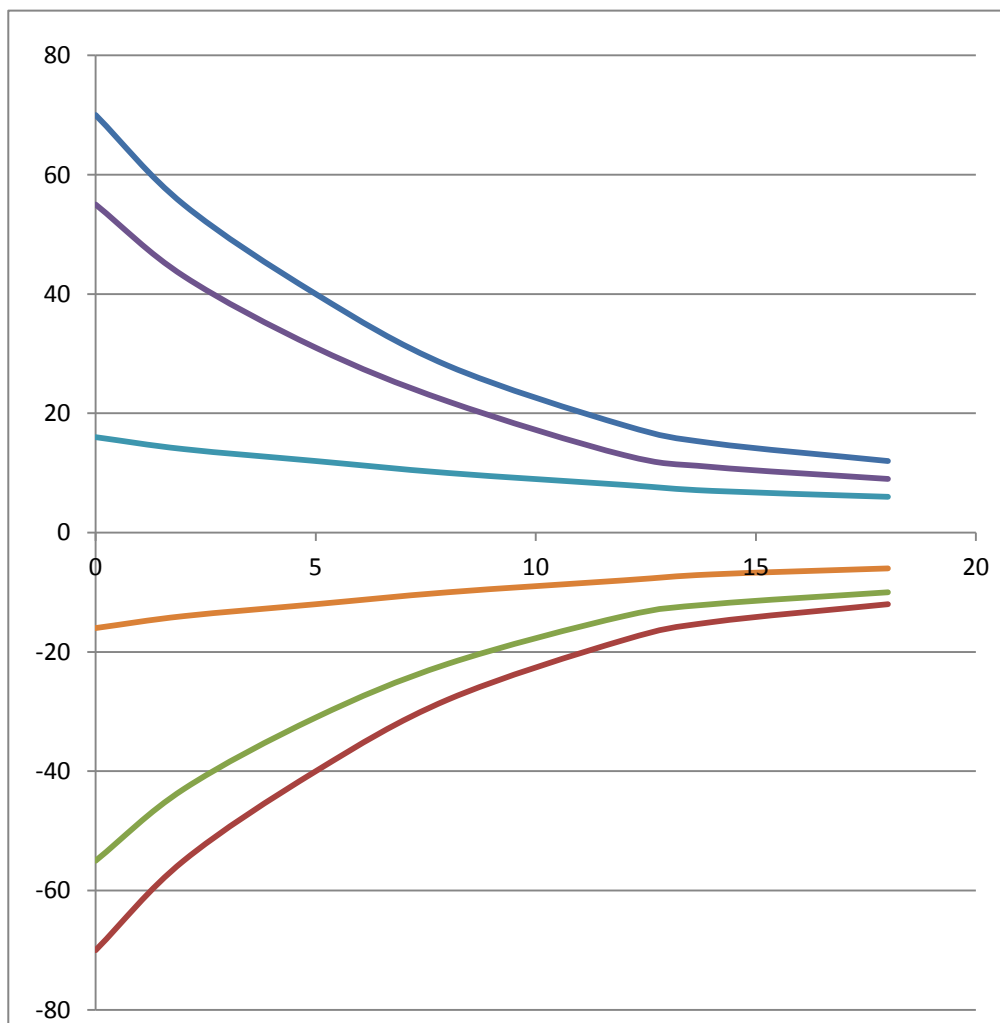


Рисунок (6) Залежність керованості підводного робота в вертикальній площині на пересічній місцевості

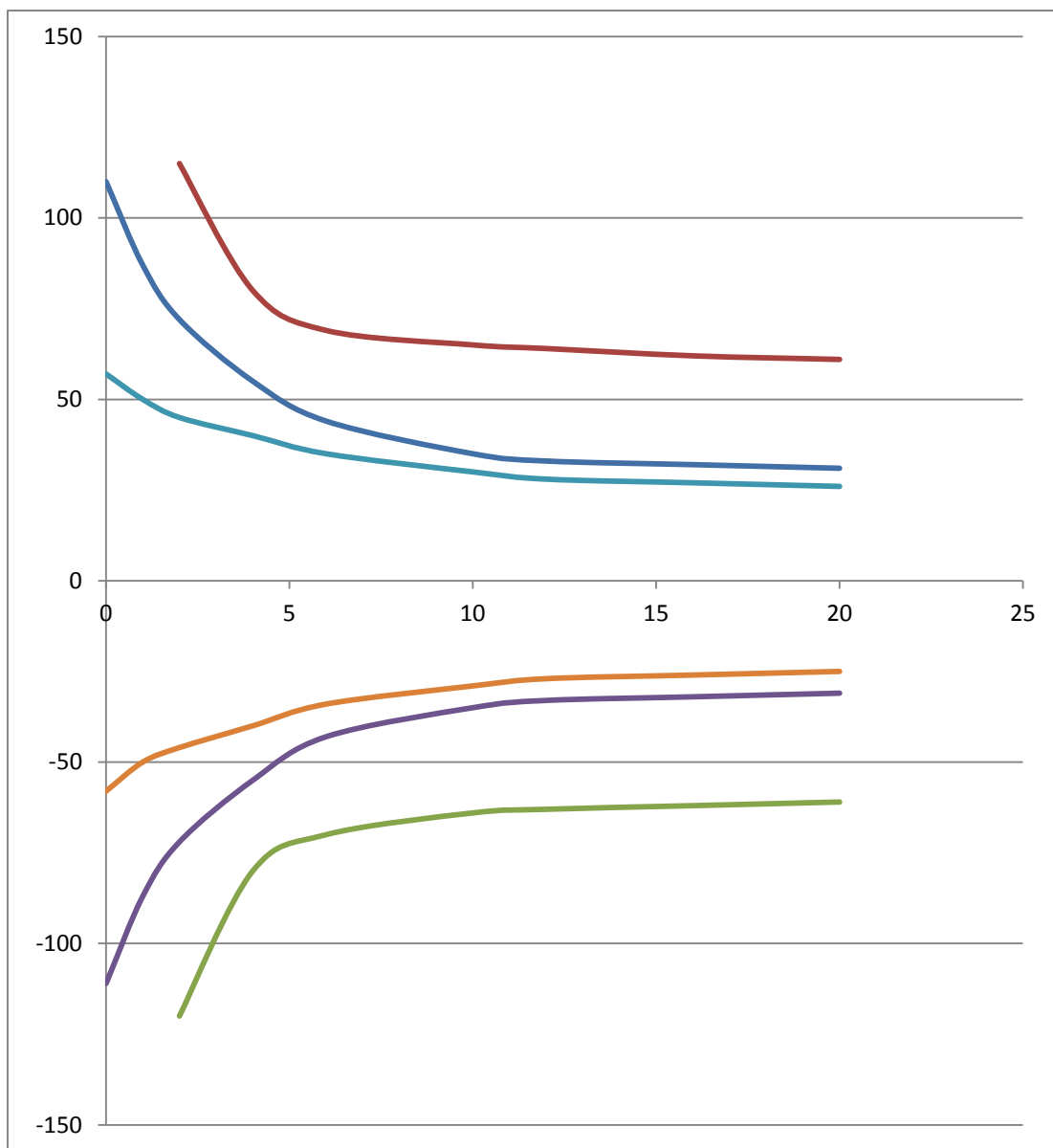


Рисунок (7) Залежність керованості підводного робота у вертикальній площині

Данні криві керованості можуть бути побудовані для підводного робота будь якої форми та структури рушійного комплексу, якщо відомі коефіцієнти опору даної форми у відповідному діапазоні кутів атаки й чисел Re . У цьому випадку можна обрати оптимальну з точки зору керованості форму робота, компоновку й упори рушіїв. З розглянутих двох форм роботів видно, що більшою керованістю володіє робот сферичної форми.

Для подальшого підвищення керованості необхідно обрати форму АПРА з меншими приєднаними масами й коефіцієнтами опору при великих кутах атаки. Цього можна досягти за допомогою сплющеної вертикальної площини

Висновки

Розглянувши загальну модель рушійного комплексу та проаналізувавши структури та класифікацію АПРА, які можуть забезпечити одночасне керування по шести ступеням свободи підводного апарата в якості основи ми поклали принцип надлишковості.

Найбільш просто реалізувати систему керування, якщо кожна пара рушіїв встановлена навколо однієї зі зв'язаних осей робота. Окрім виконання основної задачі, робот повинен забезпечити свою безпеку. Небезпечні ситуації можуть виникати внаслідок внутрішніх несправностей або через зіткнення із дном. Виявлення перешкод проведено методом поверхонь безпеки. Застосування цього методу забезпечує виявлення і обхід перешкод таким чином:

Підводний фоторобот виконує режим стеження за рельєфом дна при деякому алгоритмі руху у горизонтальній площині доки ні одна з поверхонь безпеки не наткнеться на перешкоду. Як тільки це станеться, обставини вважаються небезпечними та підводний фоторобот переключасться у режим обходу перешкоди. Визначення небезпечної ситуації залежить від розмірів поверхонь безпеки та їх положення відносно робота. При цьому для підводних роботів різної форми з різним діапазоном робочих швидкостей параметри поверхонь безпеки не будуть однаковими. Таким чином забезпечується коридор, вільний від перешкод який відповідає розмірам робота. Передній фронт відбитого акустичного сигналу поступає до приймача від найближчої озвученої точки дна. Оберемо рівень порогу детектування у приймачі так, щоб рівень сигналу від бокових пелюсток антени знаходився б нижче цього порогового значення. Якщо знак різниці позитивний, тоді перешкода лежить за поверхнею і вона безпечна. Відповідно якщо знак від'ємний – обстановка небезпечна. Таким чином, обробка інформації зводиться до мінімуму.

При роботі на складних рельєфах гальмівний шлях буде в значній мірі визначати траєкторію руху апарата. Чим більше гальмівний шлях, тим менша відстань буде пройдена у основному режимі.

Таким чином, гальмівний шлях (безпечна відстань) характеризує ефективність використання підводного фоторобота на складному рельєфі.

Кут курсу є стабілізованим, якщо робот рухається на визначеному галсі, або змінюється відповідно з обраним алгоритмом руху у горизонтальній площині.

Розглянемо траєкторію АПРА , повертаючи з певною точністю профіль рельєфу дна. У режимі відстеження даних величина визначає радіус нерівностей дна, які може відстежувати підводний робот. Вочевидь що чим менше радіус кривизни даної траєкторії підводного робота , тим більш він маневрений у вертикальній площині. Радіус нерівностей дна є величина що використовується у гідроакустиці й прийнята в океанологічній практиці. У ряду різних критеріїв , які використовуються при створенні підводних роботів, таких як критерій по глибині занурення, енергоспоживанню , автономності , даний відображає специфіку основного режиму роботи підводного робота.

Для пода підвищення керованості необхідно обрати форму АПРА з меншими приєднаними масами й коефіцієнтами опору при великих кутах атаки. Цього можна досягти за допомогою сплющеної вертикальної площини

В Результаті розробки структури АПРА та вдосконалення алгоритму керування ми дійшли висновку, що для підвищення стійкості система потребує розробки рекомендацій що до оновлення електронного супроводу системи керування ПРТП за допомогою покращення схеми системи керування

3. Оцінка ефективності системи керування роботом

Застосування розроблених алгоритмів руху теоретично забезпечує підводному роботу необхідну пристосованість на складних рельєфах дна , але з цього не означає, що такі режими можливо реалізувати технічно. Для виконання поставлених задач робот повинен бути достатньо маневреним.

Як відомо, робот дійсно буде мати необхідну керованість, якщо його система управління здатна виробити необхідні керуючі сили та моменти. Кількість даних, що контролюється рушійним комплексом ступенів свободи визначається його структурою можливі структури рушійного комплексу розглянуті (глава 1.1). Необхідні значення упорів рушіїв для даної структури рушійних комплексів залежать від маси робота , його форми, плавучості та режимів маневрування. За звичай при визначенні упорів виходять з того ,що упори повинні забезпечувати рівномірний прямолінійний рух апарата із заданою швидкістю. Але рух АПРА суттєво відрізняється від рівномірного та прямолінійного. Цим і пояснюється необхідність окремого дослідження питання технічної реалізації АПРА з достатньою маневреністю.

3.1 Розробка рекомендацій щодо технічної реалізації алгоритмів керування автоматичним підводним робото технічним апаратом

Із розглянутих алгоритмів руху АПА легко побачити, що маневри у вертикальній та горизонтальній площинах можливо здійснювати незалежно одне від одного. Таким чином, система керування АПА логічно виявляється розділеною на дві частини: класифікація та режими руху у вертикальній площині та класифікація і режими руху у горизонтальній площині. Для програмування такого руху на бортовому комп'ютері(процесорі) складемо таблиці алгоритмів, а також датчиків стану зовнішнього середовища, які визначають необхідність переключення режиму та вибору нового. Ці таблиці будуть узагальнювати розглянуті у попередніх розділах режими роботи АПА. Усі випадки переключень та режими руху у вертикальній площині без модифікованого обходу зібрані у таблиці 1, з режимом модифікованого обходу у таблиці 2, переключення та режими руху у горизонтальній площині при русі на галсі-в таблиці 3. Ці таблиці задають роботу певного кінцевого автомата, сигнали на виході якого залежать від сигналів на вході та внутрішнього стану автомата.

Таблиця (2.1)

Переключення режимів руху АПРА у вертикальній площині без модифікованого обходу перешкод

Початковий режим	Умова переключення	Апаратура розпізнавання	Кінцевий режим
Відстеження	$R_F > R_1$	Передній ГЛК	Обхід
Обхід	$R_B < R_0$	Нижній ехолот	Відстеження
Обхід	$R_F > R_{Fmax}$	Передній ГЛК	Постійна глибина
Постійна глибина	$\Delta_T > \Delta_{Tmax}$	Таймер	Відстеження
Постійна глибина	$R_F < R_1$	Передній ГЛК	Обхід
Постійна глибина	$R_B < R_0$	Нижній ехолот	Відстеження

Таким чином таблиці переключень дають просте й наглядне уявлення об інформаційній частині системи керування робота й способах обробки інформації. Можливість включення додаткових задач визначається гнучкістю системи керування робота, а також його динамічними можливостями. Використання бортової ЕОМ у контурі системи управління дозволяє достатньо просто змінювати режими руху підводного робота.

Таблиця (2.2)

Таблиця переключення режимів руху АПРА у горизонтальній площині при руху на галсі

Початковий режим	Умови переключення	Апаратура розпізнавання	Кінцевий режим
Рух по гласу	$R_L < R_2$	Лівий ГЛК	Обхід лівої перешкоди
Рух по гласу	$R_R < R_3$	Правий ГЛК	Обхід правої перешкоди
Обхід лівої перешкоди	$R_L > R_{Lmax}$ $\Delta H > \Delta H_{max}$	Лівий ГЛК Система навігації	Новий галс
Обхід лівої перешкоди	$R_L > R_{Lmax}$ $\Delta H < \Delta H_{max}$	Лівий ГЛК Система навігації	Основний галс
Обхід лівої перешкоди	$ S_2 - b_2 < \delta$	Система навігації	Основний галс
Обхід правої перешкоди	$R_R > R_{Rmax}$ $\Delta H > \Delta H_{max}$	Правий ГЛК Система навігації	Новий галс
Обхід правої перешкоди	$R_R > R_{Rmax}$ $\Delta H < \Delta H_{max}$	Правий ГЛК Система навігації	Основний галс
Обхід правої перешкоди	$ S_2 - b_2 < \delta$	Система навігації	Основний галс
Будь який	$R_L < R_2$ $R_T < R_3$	Лівий ГЛК Правий ГЛК	Аварійний режим

По мірі збільшення кількості дослідницьких задач, що стоять перед АПА, відповідно необхідна розробка відповідних алгоритмів руху, системи датчиків та логіки переключень. Таблиці відображають специфіку виконання роботом завдань по проходженню рельєфу.

Умови переключення задаються або по часу, або по визначеним ознакам. Наприклад, зниження робота до дна та отримання проб ґрунта може виконуватися періодично. Якщо до задач робота входить детальне дослідження ділянок з магнітною аномалією, то робот переключається на детальне дослідження при досягненні цієї аномалією заданого значення.

Таким чином, таблиці переключень дають проста наочне представлення про інформаційну частину системи управління робота та способах обробки інформації. Можливість включення додаткових задач визначається гнучкістю системи управління робота а також його динамічними можливостями. Використання бортового комп'ютера в контурі системи управління дозволяє достатньо легко змінювати режими руху АПА.

Для визначення якості роботи алгоритмів та оцінки кінематики руху підводного робота на складному рельєфі була розроблена моделююча програма. Основні особливості програми наступні:

рельєф дна може бути заданим у вигляді довільної безперервної функції, для визначення наступної точки траєкторії використовується інформація про рельєф, який знаходиться тільки в зоні дії нижнього та переднього гідролокаторів(характер рельєфа дна на більш віддаленій відстані вважається не відомим, тим самим досягається виконання умови що рельєф дна для робота заздалегідь невідомий);

переключення руху робота відбувається згідно таблиці 3.1;

моделюється тільки кінематика руху(наслідком цього є різкі перегини у траєкторії при зміні режимів);

в кожному режимі руху відбувається точно до відповідного алгоритму (моделюється траєкторія ідеального руху).

Приклади моделювання за допомогою цієї програми приведені на Рис 5. На Рис 2.10 показані траєкторії руху АПА при більш складних рельєфах дна. На Рис 2.10а ділянка дна це рівна поверхня з однією щілиною і виступом.

У точці 1 робот, відстежуючи дно починає спускатися. Але у точці 2 передня поверхня безпеки наткнеться на дно. І робот почне рух по горизонталі разом з „ ковзаючею „ по дну поверхнею безпеки. Тим самим буде попереджено небезпечний спуск до щілини. При подальшому русі відстань по вертикалі до дна почне зменшуватися і в точці 3 досягне необхідного $R_0=6\text{м}$. До точки 4 робот переміщується у режимі стеження. В точці 4 передній гідролокатор виявить перешкоду, і робот до точки 5 буде рухатися у режимі обходу. В точці 5 передній гідролокатор загубить перешкоду, і до точки 6 робот буде рухатись в режимі постійної. В точці 6 робот переходить на відстеження.

На Рис 2.10б рельєф дна являє собою вертикальну стінку з горизонтальними уступами. Перший обхід починається в точці 1 і закінчується в точці 2, де підводний робот до точки 3 працює в режимі від слідування. Від точки 3 до точки 4 знову йде режим обходу, потім робот переключається на режим відстеження. Таким чином алгоритми руху повинні забезпечувати роботу необхідну адаптивність на рельєфах різної складності.

У якості основних рівнянь, що використовуються відомі теореми про зміну кількості та моменту кількості рухів твердого тіла в проекціях на пов'язані осі. Введемо праву ортогональну систему координат $AZ_1Z_2Z_3$, пов'язану з роботом, в якій початок (точка А) співпадає з центром мас робота, ось AZ_3 спрямована з корми в ніс, ось AZ_2 - з лівого борта на правий, ось AZ_1 доповнює систему до правої ортогональної. Кутове положення осей AZ_2 , відносно нерухомо пов'язаних з дном OX_p , визначається трьома кутами Ейлера φ , θ , γ . Розглянемо форми роботів у вигляді еліпсоїдів обертання, у яких центральні осі співпадають з осями системи координат $AZ_1Z_2Z_3$. Тоді рівняння руху робота в вертикальній площині можна записати наступним чином: $(m+\lambda_{11})v_1+(m+\lambda_{33})v_3\omega_2=G\cos\theta + c_{Z1}\frac{pv}{2}S+F_{Z1}$

$$(m+\lambda_{33})v_3+(m+\lambda_{11})v_1\omega_2=G\sin\theta + c_{Z3}\frac{pv}{2}S+F_{Z3} \quad (4.1)$$

$$(I_{22} + \lambda_{55})\omega_2 = -y_0pgV\sin\theta + m_{Z2}\frac{pv}{2}V + M_{Z2}$$

$$\Theta = \omega_2$$

Тут m – маса робота;

$\lambda_{11}, \lambda_{33}, \lambda_{55}$ - коефіцієнти приєднаних мас й моменту інерції еліпсоїда;

v_1, v_3 - складові лінійної швидкості у проекціях на AZ_1 та AZ_3 ;

ω_2 - кутова швидкість;

y_0 - метацентрична висота ;

G – сила залишкової плавучості;

Θ – кут деферента ;

c_{Z1}, c_{Z3}, m_{Z2} - коефіцієнт сил та моменту опору в проекціях на пов'язані осі;

S – площа поперечного перерізу робота;

I – його об'єм ;

F_{Z1} , F_{Z3} , M_{Z2} - сили й моменти зі сторони рушійного комплексу.

Надалі будемо розглядати дві можливі форми легкого корпусу АПРА: у вигляді сфери й у вигляді сплющеного еліпсоїда обертання зі співвідношенням довжин на півосей $b/a = 0,47$. Для вказаного еліпсоїда коефіцієнти опору у діапазоні кута атаки від 0° до 90° та при числі

$Re = 10^5 \div 10^6$ були отримані експериментально. Для численних розрахунків знадобляться не дискретні , а неперервні залежності коефіцієнтів опору від числа Re та кута атаки α .

На першому кроці усі табличні коефіцієнти перераховувались зі швидкостей системи координат у зв'язну . Для визначення $c_{Z3}(\alpha, Re)$, $c_{Z1}(\alpha, Re)$ й $m_{Z2}(\alpha, Re)$ обирались два сусідніх кута , при яких проводились вимірювання, таких що $\alpha_1 \leq \alpha \leq \alpha_2$.

Потім з таблиці визначались два рядки чисел (для кожного коефіцієнта):

$$c_{Z1}(\alpha_1, Re_1) \ c_{Z1}(\alpha_2, Re_1) \ c_{Z3}(\alpha_1, Re_1) \ c_{Z3}(\alpha_2, Re_1) \ m_{Z2}(\alpha_2, Re_1)$$

$$c_{Z1}(\alpha_1, Re_2) \ c_{Z2}(\alpha_2, Re_2) \ c_{Z3}(\alpha_1, Re_2) \ c_{Z3}(\alpha_2, Re_2) \ m_{Z2}(\alpha_2, Re_2)$$

$$\begin{matrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{matrix}$$

$$c_{Z1}(\alpha_1, Re_n) \ c_{Z1}(\alpha_2, Re_n) \ c_{Z3}(\alpha_1, Re_n) \ c_{Z3}(\alpha_2, Re_n) \ m_{Z2}(\alpha_2, Re_n)$$

Тут Re_1, Re_2, \dots, Re_n - числа Райнольдса , при яких визначились коефіцієнти опору. При даних α_1 й α_2 залежності c_{Z1} , c_{Z3} , m_{Z2} від числа Re інтерполювались кубічними сплайнами :

$$c_{Z1}(\alpha_1, Re) = Sp[Re, Re_1, Re_2, \dots, Re_n; c_{Z1}(\alpha_1, Re_1), \dots, c_{Z1}(\alpha_1, Re_n)],$$

$$c_{Z1}(\alpha_2, Re) = Sp[Re, Re_1, Re_2, \dots, Re_n; c_{Z1}(\alpha_2, Re_1), \dots, c_{Z1}(\alpha_2, Re_n)],$$

$$m_{Z2}(\alpha_2, Re) = Sp[Re, Re_1, Re_2, \dots, Re_n; m_{Z2}(\alpha_2, Re_1), \dots, m_{Z2}(\alpha_2, Re_n)],$$

Використання сплай-інтерполяції пояснюється тим що точність експериментальних даних , складає 3%. Окрім того залежності коефіцієнтів опору числа Re повинні бути гладкими (це й забезпечує сплайн-інтерполяція). Таким чином , для даних α та Re визначились пари значень:

$c_{Z1} (a_1, Re) , c_{Z1} (a_2, Re) ;$

$c_{Z3} (a_1, Re), c_{Z3} (a_2, Re);$

$m_{Z2} (a_1, Re) , m_{Z2} (a_2, Re).$

Значення коефіцієнтів при заданих a визначились лінійною інтерполяцією:

$$c_{Z1} (a , Re) = c_{Z1} (a_1, Re) + \frac{c_{Z1} (a_2, Re) - c_{Z1} (a_1, Re)}{a_2 - a_1} (a - a_1) ,$$

$$c_{Z3} (a , Re) = c_{Z3} (a_1, Re) + \frac{c_{Z3} (a_2, Re) - c_{Z3} (a_1, Re)}{a_2 - a_1} (a - a_1) ,$$

$$m_{Z2} (a , Re) = m_{Z2} (a_1, Re) + \frac{m_{Z2} (a_2, Re) - m_{Z2} (a_1, Re)}{a_2 - a_1} (a - a_1)$$

При розрахунках на ЕОМ використовувалась підпрограми розрахунку кубічного сплайна.

Проекції керуючої сили й моменту F_{Z1}, F_{Z3} . M_{Z1} залежать від структури рушійного комплексу й значень упорів на кожному з рушіїв. Розглянемо лише одну , найчастіше використовувану компоновку рушіїв для керування в вертикальній площині (4.1), а саме використання двох горизонтальних й двох вертикальних рушіїв.

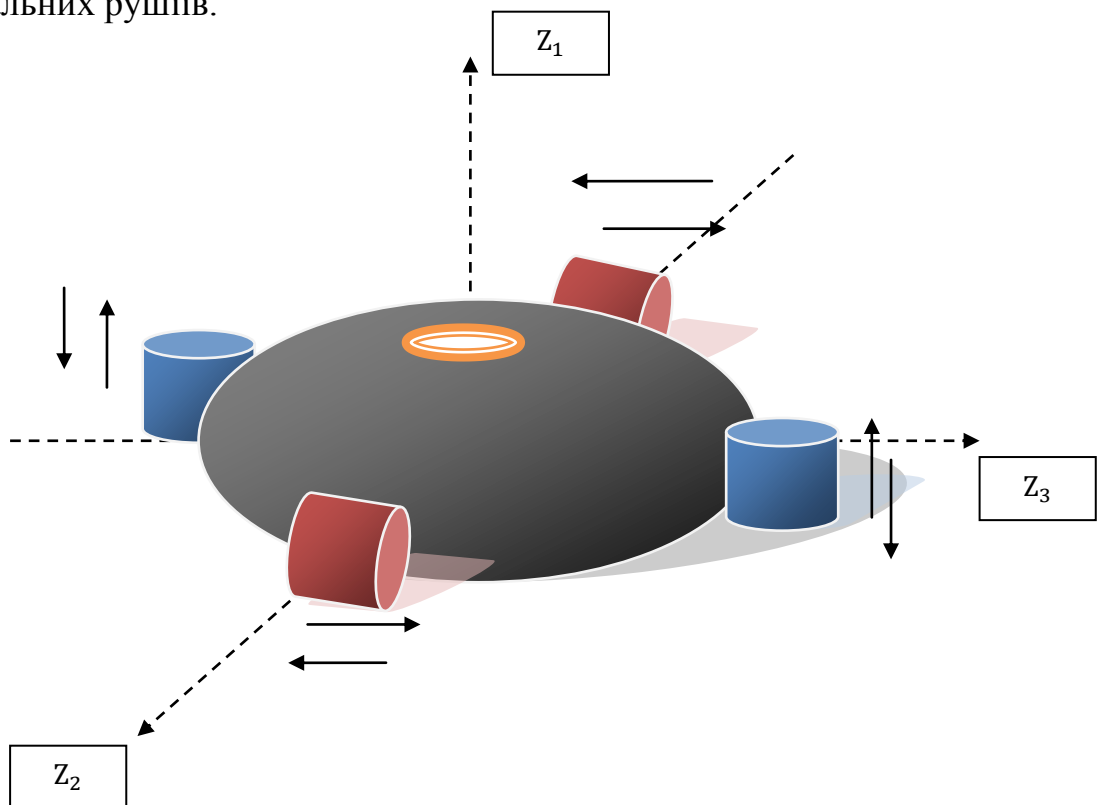


Рисунок (8) Рушійний комплекс підводного робота

Розглянемо методику, що придатна й для інших компоновок рушійного комплексу й форм АПРА, якщо відомі коефіцієнти опору.

Горизонтальні рушії розташовані у площині AZ_2Z_3 уздовж осі AZ_3 . Кожний з них може розвивати максимальний упор $T_{Z3\max}$ на прямому ході й упор $T_{Z3\min}$ на реверсі. Так як розглядається рух у вертикальній площині, то упори цих рушіїв в кожний момент часу рівні, а їх сума відповідно дорівнює $2T_{Z3}$.

Тоді маємо

$$2T_{Z3\min} \leq F_{Z3} = 2T_{Z3} \leq 2T_{Z3\max} \quad (4.2)$$

Вертикальні рушії забезпечують стабілізацію кута дифферента й вертикальне переміщення робота. Позначимо максимальний упор, що розвиває кожний з вертикальних рушіїв на прямому ході, через $T_{Z1\max}$, на реверсі – через $T_{Z1\min}$. Нехай в деякий момент часу упор носового вертикального рушія буде T'_{Z1} , кормового – T''_{Z1} , а відстань між рушіями d . При цьому отримаємо

$$F_{Z1} = T'_{Z1} + T''_{Z1},$$

$$M_{Z2} = d (T'_{Z1} - T''_{Z1})/2, \quad (4.3)$$

Для підводного робота основним режимом руху є відстеження дна у стабілізованому положенні. Необхідно забезпечити високу точність виконання алгоритму в умовах перемінного рельєфу дна. У зв'язку з цим дослідження динаміки поперед усього буде проводитися саме для цього режиму.

Застосуємо метод рішення першої задачі динаміки. Загальна методика дослідження динаміки проєктованих адаптивних систем за допомогою першої задачі детально викладена у главі вище.

У другій главі було показано, що відстеження можна проводити при різноманітних алгоритмах зміни горизонтальної складової швидкості. Були обрані два з них: алгоритм постійної горизонтальної складової та алгоритм з горизонтальною складовою швидкості, яка залежить від нахилу дна. Знайдемо необхідну швидкість й прискорення АПРА для точного відстеження деякого рельєфу $y_1 = y_1(y_3)$. Для режиму постійної горизонтальної складової швидкості при $v_3 = v = \text{const}$ маємо

$$v_3 = v, v_3 = 0,$$

$$v_1 = vW, \quad v_1 = v^2P, \quad (4.4)$$

$$\omega_2 = \theta = 0.$$

Для режиму постійного модуля швидкості (5) рівняння кінематики записується у наступному вигляді:

$$v_3 = v/\sqrt{1+W^2}, \quad v_3 WP(1+W^2)^2, \quad (4.5)$$

$$v_3 = vW/\sqrt{1+W^2}, \quad v_1 = v^2P/(1+W^2)^2$$

$$\omega_2 = \theta = 0.$$

Тут $W = \operatorname{tga} = \frac{dy_1}{dy_3}$ – місцевий нахил дна; $-P = \frac{d^2y_1}{dy_3^2}$ зміна нахилу дна.

Підставимо вираз (4.4), (4.5) у рівняння динаміки АПРА в вертикальній площині (4.1) й визначимо необхідні для реалізації такого руху значення упорів горизонтальних й вертикальних рушіїв. Для режиму $v_3 = v = \operatorname{const}$ програмні керуючі сили будуть наступними:

$$2T_{Z3} = -c_{Z3} \frac{pv^2}{2} S(1+W^2),$$

$$T'_{Z1} + T''_{Z1} = (m + \lambda_{11})v^2P - G - c_{Z1} \frac{pv^2}{2} S(1+W^2), \quad (4.6)$$

$$T'_{Z1} - T''_{Z1} = -\frac{2}{d} m_{Z2} \frac{pv^2}{2} V(1+W^2).$$

Для режиму $v_1^2 + v_3^2 = v^2 = \operatorname{const}$ можна записати

$$2T_{Z3} = (m + \lambda_{33}) [-v^2 WP/(1+W^2)^2] - c_{Z3} \frac{pv^2}{2} S$$

$$T'_{Z1} + T''_{Z1} = (m + \lambda_{11})v^2P/(1+W^2)^2 - G - c_{Z1} \frac{pv^2}{2} S, \quad (4.7)$$

$$T'_{Z1} - T''_{Z1} = -\frac{2}{d} m_{Z2} \frac{pv^2}{2} V.$$

З рівнянь (4.6), (4.7) слід, що даному значенні нахилу W можливі значення параметра рельєфу P , при яких АПРА може точно відстежувати дно, обмежені. Це пов'язано з тим що значення упорів горизонтальних і вертикальних рушіїв кінцеве. Чим ширше діапазон можливих для робота змін P для даного W , тим більший клас рельєфів робот може точно відстежувати. Таким чином про динамічні можливості робота в режимі відстеження можна судити за розміром області $(W-P)$. По термінології монографії назовемо ці

області областями динамічної достатності. З формул (4.6) та (4.7) видно , що області динамічної достатності залежать від режиму зміни швидкості , максимальних та мінімальних упорів рушіїв для даного рушійного комплексу , від маси робота , його форми й плавучості.

Розглянемо область динамічної достатності для відстеження в режимі $v_3 = v = \text{const}$. Як видно з першого рівняння системи (4.6), область (W-P) для цього режиму завжди обмежена по W. Граничні значення виявляються з рівняння

$$2T_{Z3\max} + c_{Z3} \frac{pv^2}{2} S (1+W^2) = 0 \quad (4.8)$$

По фізичному сенсу скінченність областей динамічної достатності у даному випадку слід з того , що підвищені нахилу дна модуль швидкості робота також повинен нескінченно зростати (формула 4.4), проте це не можливо. Смысл обмеження по W заключається у тому, що область нахилу , який робот може точно відстежити , кінцева. Введемо наступні значення:

$$c'_{Z1} = c_{Z1} - \frac{4}{3} \Pi_0 m_{Z2}$$

$$c''_{Z1} = c_{Z1} + \frac{4}{3} \Pi_0 m_{Z2}$$

$$\Pi_0 = 2a/d,$$

де 2a – довжина робота.

Знайдемо вид самої області для цього режиму. Позначимо верхній грань області динамічної достатності по P через P_{\max} , а нижню грань – через P_{\min} . Будемо використовувати відоме співвідношення між об'ємом та прощеною поперечного січення для еліпсоїда обертання :

$$V/S = \frac{4}{3}a.$$

Тоді для режиму $v_3 = v = \text{const}$, вирішуючи систему керування (4.2) , (4.3), (4.6) відносно P знаходимо грань області динамічної достатності:

$$P_{\min} \leq P \leq P_{\max}$$

Тут

$$P_{\max} = \min(P'_{\max} , P''_{\max}) ,$$

$$P_{\min} = \max(P'_{\min}, P''_{\min}),$$

Де

$$P'_{\max} = [2T_{Z1\max} + G + c'_{Z1} \frac{pv^2}{2} S(1+W^2)] / (m+\lambda_{11})v^2$$

$$P''_{\max} = [2T_{Z1\max} + G + c''_{Z1} \frac{pv^2}{2} S(1+W^2)] / (m+\lambda_{11})v^2$$

$$P'_{\min} = [2T_{Z1\min} + G + c'_{Z1} \frac{pv^2}{2} S(1+W^2)] / (m+\lambda_{11})v^2$$

$$P''_{\min} = [2T_{Z1\min} + G + c''_{Z1} \frac{pv^2}{2} S(1+W^2)] / (m+\lambda_{11})v^2$$

При цьому грані області по W визначаються з рівняння (4.8) , (4.2) , (4.3) , (4.7) відносно P й знаходить грань області динамічної достатності:

$$P_{\min} \leq P \leq P_{\max} \quad (4.9)$$

Де

Для $W \geq 0$:

$$P_{\max} = \min(P_{1\max}^+, P_{2\max}^+, P_{3\max}^+), \quad (4.10)$$

$$P_{\min} = \max(P_{1\min}^+, P_{2\min}^+, P_{3\min}^+),$$

Для $W \leq 0$

$$P_{\max} = \min(P_{1\max}^-, P_{2\max}^-, P_{3\max}^-) \quad (4.11)$$

$$P_{\min} = \max(P_{1\min}^-, P_{2\min}^-, P_{3\min}^-)$$

Тут

$$P_{1\max}^+ = (2T_{Z\max} + G + c'_{Z1} \frac{pv^2}{2} S) \frac{(1+W^2)^2}{(m+\lambda_{11})v^2}$$

$$P_{2\max}^+ = (2T_{Z1\max} + G + c''_{Z1} \frac{pv^2}{2} S) \frac{(1+W^2)^2}{(m+\lambda_{11})v^2}$$

$$P_{3\max}^+ = (2T_{Z3\max} + c_{Z3} \frac{pv^2}{2} S) \frac{(1+W^2)^2}{(m+\lambda_{33})v^2} \quad (4.12)$$

$$P_{1\min}^+ = (2T_{Z1\min} + G + c'_{Z1} \frac{pv^2}{2} S) \frac{(1+W^2)^2}{(m+\lambda_{11})v^2}$$

$$P_{2\min}^+ = (2T_{Z\min} + G + c''_{Z1} \frac{pv^2}{2} S) \frac{(1+W^2)^2}{(m+\lambda_{11})v^2}$$

$$P_{3\min}^+ = (2T_{Z3\max} + c_{Z3} \frac{pv^2}{2} S) \frac{(1+W^2)^2}{(m + \lambda_{33})v^2 W}$$

$$P_{1\max}^- = P_{1\max}^+$$

$$P_{2\max}^- = P_{2\max}^+$$

$$P_{3\max}^- = - (2T_{Z3\max} + c_{Z3} \frac{pv^2}{2} S) \frac{(1+W^2)^2}{(m + \lambda_{33})v^2 W}$$

$$P_{1\min}^- = P_{1\min}^+$$

$$P_{2\min}^- = P_{2\min}^+$$

$$P_{3\min}^- = (2T_{Z3\min} + c_{Z3} \frac{pv^2}{2} S) \frac{(1+W^2)^2}{(m + \lambda_{33})v^2}$$

Розглянемо загальні властивості області динамічної достатності для режиму відстеження при $v_1^2 + v_3^2 = v^2 = \text{const}$. Дана область також може бути обмежена по значенню нахилу W . Однак її можна „зробити„ свідомо необмеженою по W , обравши відповідним чином упори горизонтальних й вертикальних рушіїв. Для цього достатньо, щоб верхня грань області по W була завжди більше нуля, а нижня – нижче нуля, що буде так, якщо

$$2T_{Z3\max} + c_{Z3} \frac{pv^2}{2} S > 0,$$

$$2T_{Z1\max} > \max [-G - (c_{Z1} \pm \frac{4}{3} m_{Z2} \Pi_0) \frac{pv^2}{2} S] \quad (4.13)$$

$$2T_{Z1\min} < \min [-G - (c_{Z1} \pm \frac{4}{3} m_{Z2} \Pi_0) \frac{pv^2}{2} S]$$

Перша умова в системі нерівностей (4.13) гарно відома та використовується для вибору упорів горизонтальних рушіїв для підводних апаратів, які повинні мати швидкість горизонтального ходу, яка дорівнюватиме v . Другі дві умови в системі (4.13) дозволяють визначити мінімально необхідні упори вертикальних рушіїв для АПРА. По фізичному смислу останні дві нерівності у системі (4.13) означають, що вертикальні рушії повинні забезпечити стабілізування по куту деферента руху в вертикальній площині на даній швидкості v при будь якому куті атаки α , якщо АПРА має залишкову плавучість G . Ці потреби до вертикальних рушіям відрізняються від викладених вище для режиму зависання АПРА, так як режим руху підводного апарата абсолютно інший. У цьому сенсі умови (4.13) відображають специфіку задач АПРА.

Якщо значення упорів рушіїв задовольняють умовам (4.13) з точки зору динамічних можливостей краще використовувати алгоритм відстеження у вертикальній площині з постійним модулем швидкості, коли область динамічної достатності не обмежений по W . Таким чином, додаткова складність в керуванні при реалізації такого режиму (визначені місцевого нахилу дна) виправдовується за рахунок збільшення точності відстеження у всьому діапазоні зміни нахилів дна.

Розглянемо отримані в загальному вигляді області динамічної достатності для підводного робота сферичної форми. У цьому випадку

$$c_{Z3} = -c_0(Re) \cos a,$$

$$c_{Z1} = -c_0(Re) \sin a.$$

$$m_{Z2} = 0$$

$$\lambda_{11} = \lambda_{33} = \lambda_0 \frac{1}{2} \rho V$$

$$\text{де } \tan a = W.$$

Розглянемо режим $v_1^2 + v_3^2 = v^2 = \text{const}$. Умови (4.13) для сферичної форми робота перетворюються до виду

$$2T_{Z3\max} > c_0 \frac{\rho v^2}{2} S$$

$$2T_{Z1\max} > c_0 \frac{\rho v^2}{2} S - G$$

$$2T_{Z1\min} < -c_0 \frac{\rho v^2}{2} S - G$$

Сама область задається наступним чином:

При $W \geq 0$

$$\begin{aligned} & \max[(2T_{Z1\min} + G - c_0 F_0 W / \sqrt{1 + W^2}) (1 + W^2)^2 / (m + \lambda_0) v^2 ; \\ & -(2T_{Z3\max} - c_0 F_0 W / \sqrt{1 + W^2}) (1 + W^2)^2 / (m + \lambda_0) v^2 W] \leq P \leq \\ & \leq \min [(2T_{Z1\max} + G - c_0 F_0 W / \sqrt{1 + W^2}) (1 + W^2)^2 / (m + \lambda_0) v^2 ; \\ & -(2T_{Z3\min} - c_0 F_0 / \sqrt{1 + W^2}) (1 + W^2)^2 / (m + \lambda_0) v^2 W]; \end{aligned} \quad (4.15)$$

при $W \leq 0$

$$\begin{aligned} & \max[(2T_{Z1\min} + G - c_0 F_0 W / \sqrt{1 + W^2}) (1 + W^2)^2 / (m + \lambda_0) v^2; \\ & -(2T_{Z3\min} - c_0 F_0 / \sqrt{1 + W^2}) (1 + W^2)^2 / (m + \lambda_0) v^2 W \leq P \leq \\ & \leq \min [(2T_{Z1\max} + G - c_0 F_0 W / \sqrt{1 + W^2}) (1 + W^2)^2 / (m + \lambda_0) v^2; \\ & -(2T_{Z3\max} + G - c_0 F_0 / \sqrt{1 + W^2}) (1 + W^2)^2 / (m + \lambda_0) v^2 W] \end{aligned}$$

Тут введено позначення ; $F_0 = \rho v^2 S / 2$.

Для даної форми підводного робота можна показати, що дійсно , якщо виконується умови (4.14), то область динамічної достатності для режиму

$|v| = v = \text{const}$ також обмежена. Нехай не виконується перша умова у системі (4.14). Це може бути, якщо на робочій глибині АПРА не вирівняв свою плавучість, тобто

$$2T_{Z1\max} < c_0 F_0 - G .$$

Тоді як слід з виразу (4.15) , верхня й нижня грані перетнуться в точці W_0 :

$$W_0 = (-B_{1\max} 2T_{Z3\max} - c_0 F_0 (B_{1\max}^2 + (2T_{Z3\max})^2 - (c_0 F_0)^1)^{1/2}) / (B_{1\max}^2 - c_0^2 F_0^2),$$

Де

$$B_{1\max} = 2T_{Z1\max} + G ,$$

Тобто область динамічної достатності обмежена при позитивних нахилах.

Примір такої області динамічної достатності приведений на мал. 9.

Коли виконуються умови (11) , область динамічної достатності при $|V| = v = \text{const}$ не обмежений по W мал. 11.

Для сферичної форми АПРА область динамічної достатності в режимі $v_3 = v = \text{const}$ записується у вигляді

$$\frac{2T_{Z1\min} + G - F_0 c_0 W \sqrt{1 + W^2}}{(m + \lambda_0) v^2} \leq P \leq \frac{2T_{Z1\max} + G - F_0 c_0 W \sqrt{1 + W^2}}{(m + \lambda_0) v^2}$$

$$-W_{\text{кр}} \leq W \leq W_{\text{кр}} ,$$

Де $W_{кр}$ - критичне значення кута, який може відстежити робот.

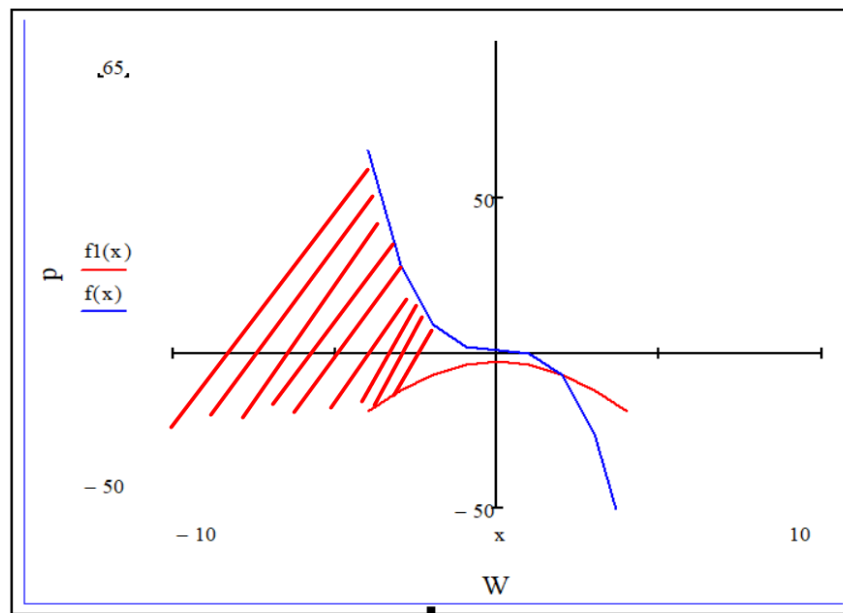


Рисунок (9) Вид області динамічної достатності з обмеженням для робота сферичної форми

Верхня й нижня грані даної області з ростом W знижуються. При $W=0$ верхня й нижня грані даної області співпадають з відповідними гранями області динамічної достатності для режиму $|v| = v = \text{const}$. При виконанні умови (4.14) область динамічної достатності для режиму $v_3 = v = \text{const}$.

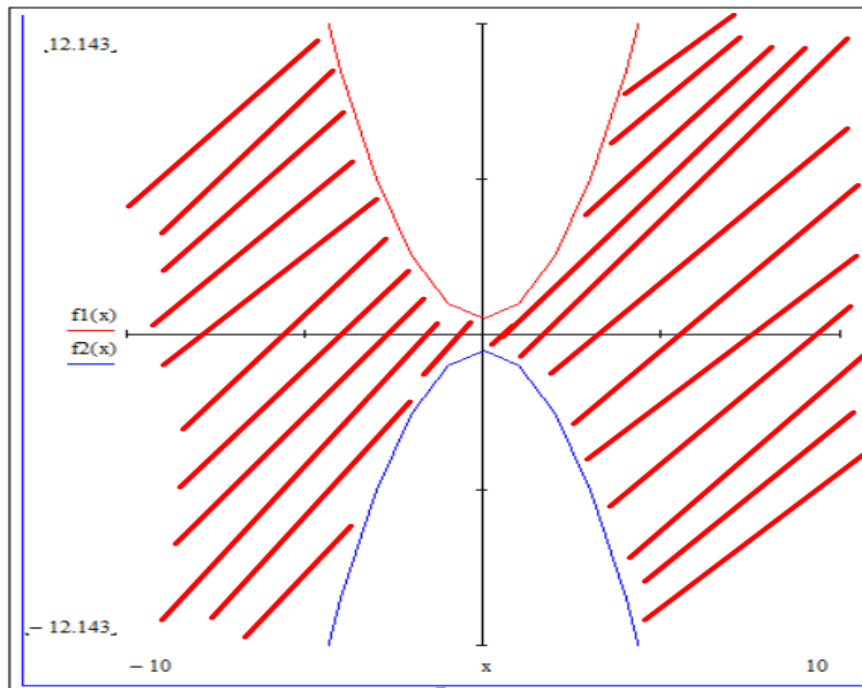


Рисунок (10) порівняння розмірів областей динамічної достатності робота сферичної форми для двох режимів руху

З Рис (10) видно наскільки більші динамічні можливості підводного робота при використанні керування горизонтальною складовою швидкості в залежності від нахилу дна. При збільшенні руху динамічні можливості підводного робота знижуються (Рисунок 4.4).

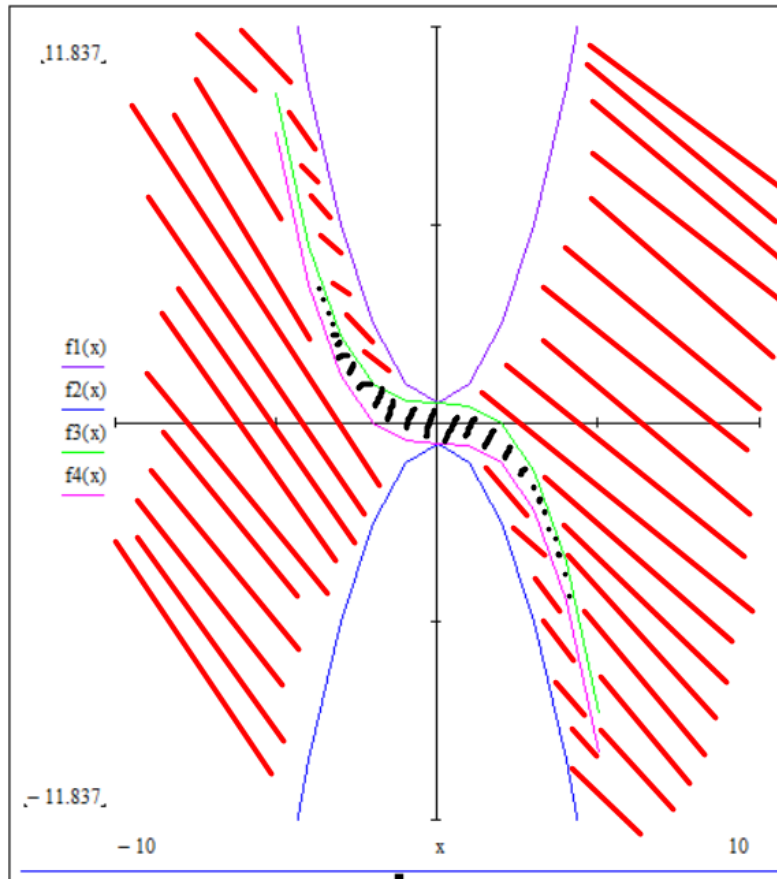


Рисунок (11) Область динамічної достатності робота сферичної форми

Параметри області динамічної достатності можуть бути використані при проектуванні підводного робота, заведемо маючого можливість відстежувати певний клас рельєфів на заданій швидкості. При цьому необхідно на площині (W-P) зобразити відповідні рельєфи й підібрати для даної конструкції підводного робота такі упори рушіїв, щоб область динамічної достатності даного робота включала би в себе лінії відповідного рельєфу.

Нехай обраний наступний клас рельєфів:

$$Y_1 = A \sin (By_3)$$

Тобто синусоїдний рельєф. Тоді на площині (W-P) вони описуються рівнянням

$$W^2 / (AB)^2 + P^2 / (AB^2)^2 = I$$

Це є еліпс з центром у точці $(0, 0)$. По осі P напіввісь еліпса дорівнює AB^2 , по осі W – AB . Маючи область динамічної достатності, представлену на Рис (4.4) . ($v = 1.8$ м/с), підводний робот буде здатний точно відстежувати рельєфи, у яких $AB^2 \leq 0.2$. При меншій швидкості руху ($v = 0.9$ м/с Рисунок 4.3) клас рельєфів буде ширше:

$$AB^2 \leq 0.8.$$

Під час руху над рельєфом з даного класу можливо очікувати, що помилки стеження будуть замалими. Це також визначається вибором законів керування. Однак для рельєфів, ділянки яких виходять за межі області динамічної достатності, показаний на Рис (4.4) можна сказати що які б досконалі закони керування закони керування не обирались для виконання програми помилки будуть великі, тому що упорів рушіїв в принципі не достатньо для реалізації такого руху. В цьому сенсі умова того що би профіль дна на площині $(W-P)$ лежав всередині області динамічної достатності робота, є необхідним, але не завжди достатнім. Через те що в процесі проектування вибір рушійного комплексу завжди передуює вибору системи керування, то на самих ранніх стадіях створення підводного робота можна за допомогою вирахування області динамічної достатності певні оцінки його динамічних можливостей.

Але в стадії припрацювання можливих конструктивних рішень для створюємого робота цей метод є достатньо складним. Крім того, якщо параметр W (уклон) має ясний фізичний сенс і дана характеристика завжди приводиться при геоморфологічному описі різних типів поверхні дна, то параметр P (швидкість змінення нахилу) в описах не зустрічається та отримати його можливо тільки непрямым шляхом.

З цих причин необхідний подальший розвиток метода області динамічної достатності стосовно АПРА. Необхідно спростити процес порівняння динамічних можливостей різних конструкцій підводних фотороботі. З іншого боку, треба оперувати такими характеристиками рельєфу які використовуються в океанологічній практиці.

3.2 Розробка рекомендацій щодо технічної реалізації удосконаленої системи керування

Для розробки АПА використовувався широкий спектр схем „електронного супроводу”, який дозволяв будувати як універсальні так і вузько спеціалізовані обчислювальні засоби. До типових схем відносяться інтерфейсні, великі, інтегральні схеми, великі інтегральні схеми генераторів, таймерів, сопроцесорів, диспетчерів пам’яті, це дозволяло виконувати стиковку з багатьма перефідійними приладами під управлінням комп’ютера.

Раніше радіоелектронна апаратура автономних підводних апаратів характеризувалася широким застосуванням слабких мікропроцесорів, однокристальних аналогових мікро-ЕОМ, які мали такі характеристики:

Кількість ядер-одне

Тактова частота-256 МГц

Кількість потоків-2

Кількість каналів пам’яті-2

Тип пам’яті-DDR2

Частота шини даних-512 МТ\с

Об’єм кеш пам’яті-4 Мб

Сьогодні ж технологія створення надійних мікропроцесорів суттєво змінилась, якщо раніше контроль параметрів відбувався на фінішному етапі виготовлення великих інтегральних схем, то зараз контролюється увесь процес їх виготовлення.

Так як схема експертної системи АПА була побудована на базі аналогового мікро-ЕОМ та застарілого процесора пропонується замінити в ній „машину логічного виводу”, на більш сучасний набір пристроїв а саме:

АЦП → новий процесор i9 9900K → ЦАП.

Чим же такий особливий останній з лінійки новітній процесор від компанії Intel? А тим що піднімає планку потужності компактних (однопроцесорних) систем на новий рівень, завдяки новітнім технологіям дев’ятого покоління

процесорів Coffee Lake та 14 нанометровому техпроцесу, що в свою чергу дозволяє йому отримати більшість інших високих характеристик, а саме:

Кількість ядер-8

Тактова частота-5.0 ГГц

Кількість потоків-16

Кількість каналів пам'яті-2

Тип пам'яті-DDR4

Частота шини даних-8 ГТ\с

Об'єм кеш пам'яті 3 рівня- 16 Мб

Ці показники значно вищі за показники аналогових систем у минулих систем керування АПА, тому заміна призведе до гарного підвищення швидкодії апарата десь 20 відсотків підвищення точності на 5 відсотків та збільшення стійкості на 13 відсотків.

Після даних змін блок схема експертної системи АПА буде виглядати як на Рис 12.

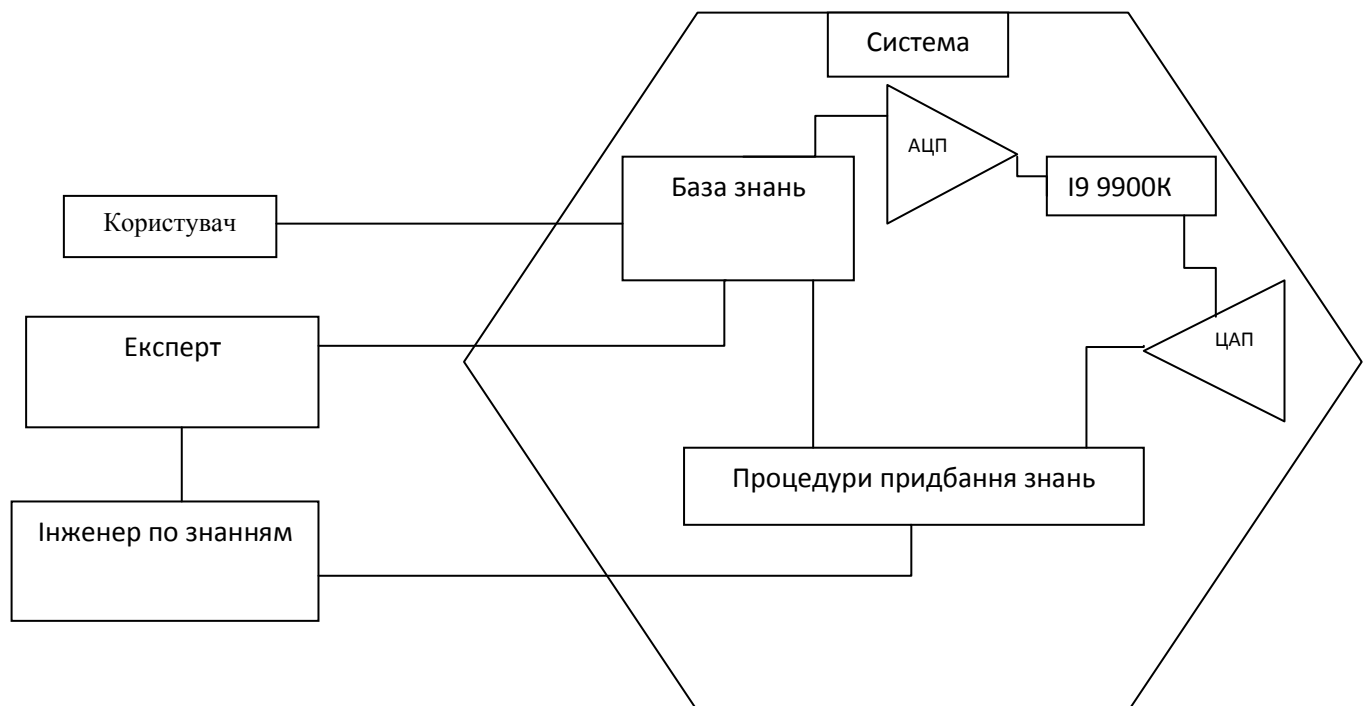


Рисунок 12. Покращена схема експертної системи

3.3 Порівняльні характеристики існуючих та удосконалених систем керування роботом

З розглянутих двох форм робіт видно, що більшою керованістю володіє робот сферичної форми.

Для подальшого підвищення керованості необхідно обрати форму АПРА з меншими приєднаними масами й коефіцієнтами опору при великих кутах атаки. Цього можна досягти за допомогою сплющеної вертикальної площини форми. Однак на сьогоднішній день немає необхідності експериментальних даних для кількісного аналізу.

Однак визначені кількісні оцінки \bar{R} для робіт такої форми зробити можливо. Розглянемо еліпсоїд обертання, сплюснутий у продольно-вертикальній площині (рибоподібний). Відношення полу осей візьмемо також як раніше ($a/b = 0.47$). Тоді при русі у продольно-вертикальній площині залежності коефіцієнтів опору від кута атаки будуть аналогічні коефіцієнтам для сфери:

$$c_3 z_3 = -c_3 \cos \alpha,$$

$$m_3 z_2 |_{w=0} = 0$$

$$c_3 z_1 = -c_3 \sin \alpha,$$

$$\lambda_{11} = \lambda_{33} = 0.28 p V_3$$

Де c_3 - коефіцієнт будь якого опору робота еліпсоїдної форми ;

V_3 – об'єм такого робота.

Тоді при

$$P = P_{1\max} = P_{3\max} = -P_{1\min} = -P_{3\min}, P_m = 1$$

Виходить вираз аналогічний (4.19):

$$\bar{R}_3 = 4/3 (1 + 0.28) / \sqrt{P^2 - c_3^2},$$

Де \bar{R}_3 - керованість робота рибоорбразної форми.

Тоді співвідношення керованості робота рибоорбразної та сферичної форми буде наступним :

$$\frac{\bar{R}_3}{R_{сф}} = \frac{1,28}{1,5} \sqrt{\frac{P^2 - c_0^2}{P^2 - c_3^2}} < 0.85$$

Таким чином за рахунок рибоподібної форми можливо підвищити керованість робота не менше ніж 15% у порівнянні зі сферичною формою.

На сьогоднішній день багато хто використовує рибоподібну форму обводу легкого корпусу.

Для того щоб сконструювати АПРА с заданою керованістю необхідно відповідно обрати значення упорів для його рушіїв. Одним зі способів підвищення , в розумінні зменшення зменшення розвороту є зменшення робочої швидкості такого АРПА. Цей шлях завжди є в запасі якщо на заданій швидкості радіус розвороту достатньо великий. Вочевидь , зниження робочої швидкості слід розглядати як певний конструкторський прорахунок , при цьому який важко виправити.

Таким чином , при технічній реалізації АПРА не обхідно проводити розрахунок руціївного комплексу з урахуванням його роботи на не встановлених режимах. На складному рельєфі такі режими будуть основними.

Дана методика дозволяє проводити необхідні розрахунки на етапі вибору порів рушіїв. Тому найбільший ефект використання слід очікувати при застосуванні методики на початкових етапах проектування.

Таблиця (3.1.2)

Таблиця переключень режимів руху АПРА в вертикальній площині з модифікованим обходом перешкод

Початковий режим	Умови переключення	Апаратура розпізнавання	Кінцевий режим
Відстеження	$R_F < R_1$	Передній ГЛК	Модифікований обхід
Модифікований обхід	$R_F > R_1$	Передній ГЛК	Відстеження
Модифікований обхід	$R_F < R_M$	Передній ГЛК	Обхід
Обхід	$R_B < R_0$	Нижній ГЛК	Відстеження
Обхід	$R_F > R_{Fmax}$	Передній ГЛК	Постійна глибина
Постійна глибина	$\Delta T > \Delta T_{max}$	Таймер	Відстеження
Постійна глибина	$R_F < R_1$	Передній ГЛК	Обхід
Постійна глибина	$R_B < R_0$	Нижній ГЛК	Відстеження

По мірі збільшення числа дослідницьких задач, які стоять перед роботом, відповідно необхідна розробка відповідних алгоритмів руху, датчиків системи й логіки переключень. Умови переключення задаються або по часу, або також по деяким признакам. Наприклад зниження робота до дна й отримання проб ґрунту може виконуватись періодично. Якщо ж в задачу робота входить детальне обстеження ділянок з магнітною аномалією, то робот переключається на детальне обстеження при досягненні цієї аномалії заданого значення.

Для виявлення якості роботи алгоритмів й оцінки стійкості системи підводного робота на складному рельєфі була розроблена моделююча програма (АПРА) на мові програмування (C++). Програма моделює рухи АПРА у вертикальній площині.

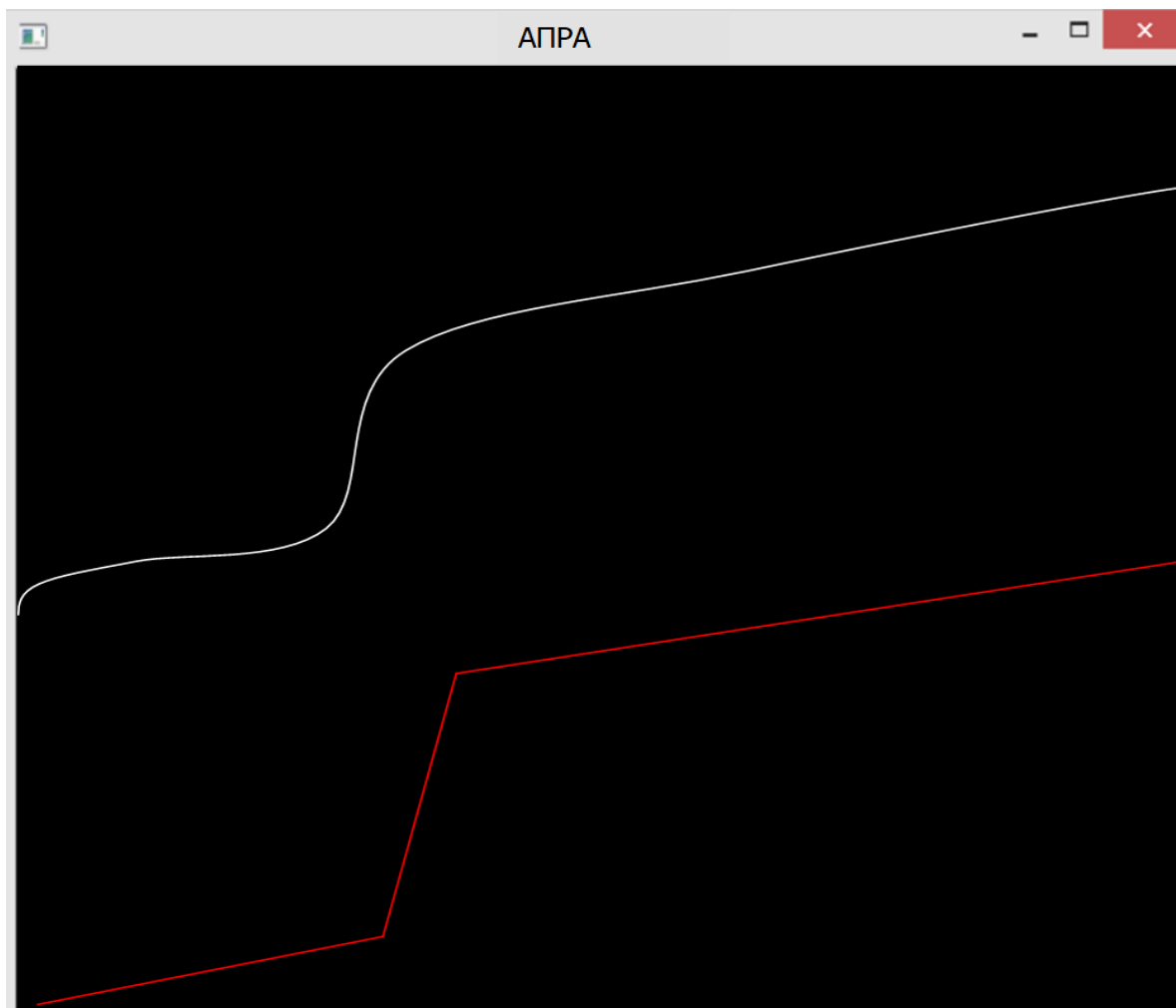


Рисунок (13) моделювання рухів робота на простому рельєфі(сходами)

Рельєф дна може задаватися у вигляді довільної неперервної функції , при цьому для виявлення наступної точки траєкторії використовується інформація про рельєф , який знаходиться тільки в зоні дії нижнього та переднього гідролокаторів (характер рельєфу дна на більш віддаленому радіусі вважається невідомим , тим самим досягається виконання умови , що рельєф дна для робота заздалегідь не відомий);



Рисунок (14) Моделювання рухів робота на складному рельєфі

Основні особливості програми наступні:

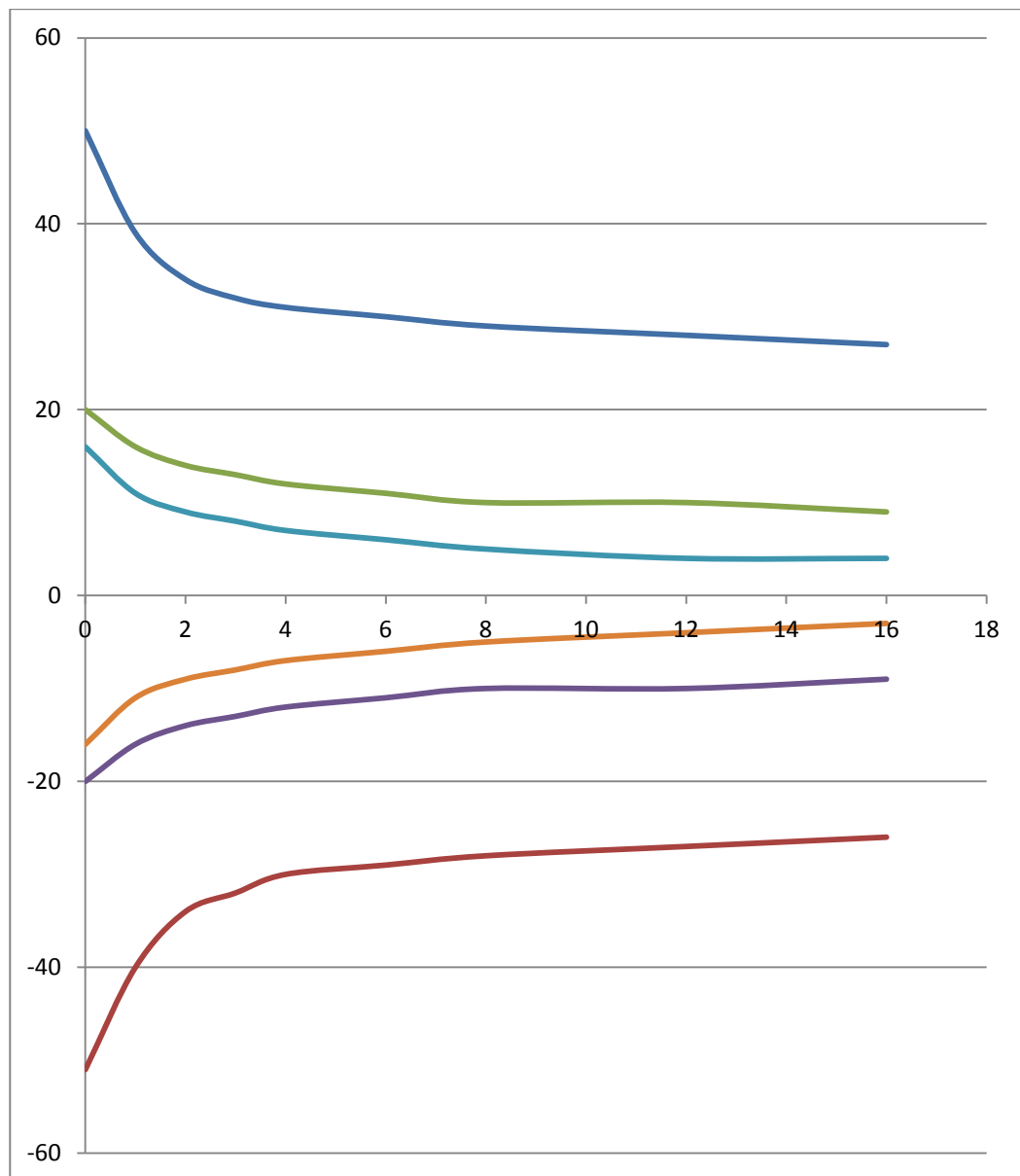
Переключення руху робота відбувається згідно таблиці (3.1) ;

Моделюється тільки кінематика рухів(слідством цього є різкі перехили в траєкторії в траєкторії при зміні режимів) ;

У кожному режимі руху відбувається точно по відповідному алгоритму
(моделювання траєкторії ідеального руху).

Приклади моделювання за допомогою цієї програми вже були приведені на (Рис 5). На Рис (зображення роботи програми) показані траєкторії руху підводного робота при більш складних рельєфах дна.

Що до керованості то керованість робота еліпсоїдної форми лишається майже незмінною, якщо знизити упори горизонтальних рушіїв у порівнянні з вертикальними (графік 1). Це пояснюється тим що максимальне значення вертикального коефіцієнта опору c_{z1} можуть бути у 8-10 разів більші, ніж горизонтальний коефіцієнт c_{z3} , якщо вони розраховані по одній площині поперечного перерізу. Це слід з експериментальних даних. Тому для підводних роботів еліпсоїдної форми упори горизонтальних рушіїв можна обрати меншими за упори вертикальних рушіїв при збереженні тієї ж керованості. Для сферичної форми робота зменшення горизонтальних упорів рушіїв призводить до різкому зниженню керованості, яка стає нижча ніж у еліпсоїдної форми робота.



Маклюнок(15) покращення проходження на простому рельєфі

Розглянемо зміни керованості від плавучості (Графік 2) при значенні

$$\Pi = \Pi_{1\max} = \Pi_{3\max} = -\Pi_{1\min} = -\Pi_{3\min} = 3.$$

Для сферичного підводного робота значення $\Pi=3$ достатньо велике у порівнянні з коефіцієнтом опору c_0 .

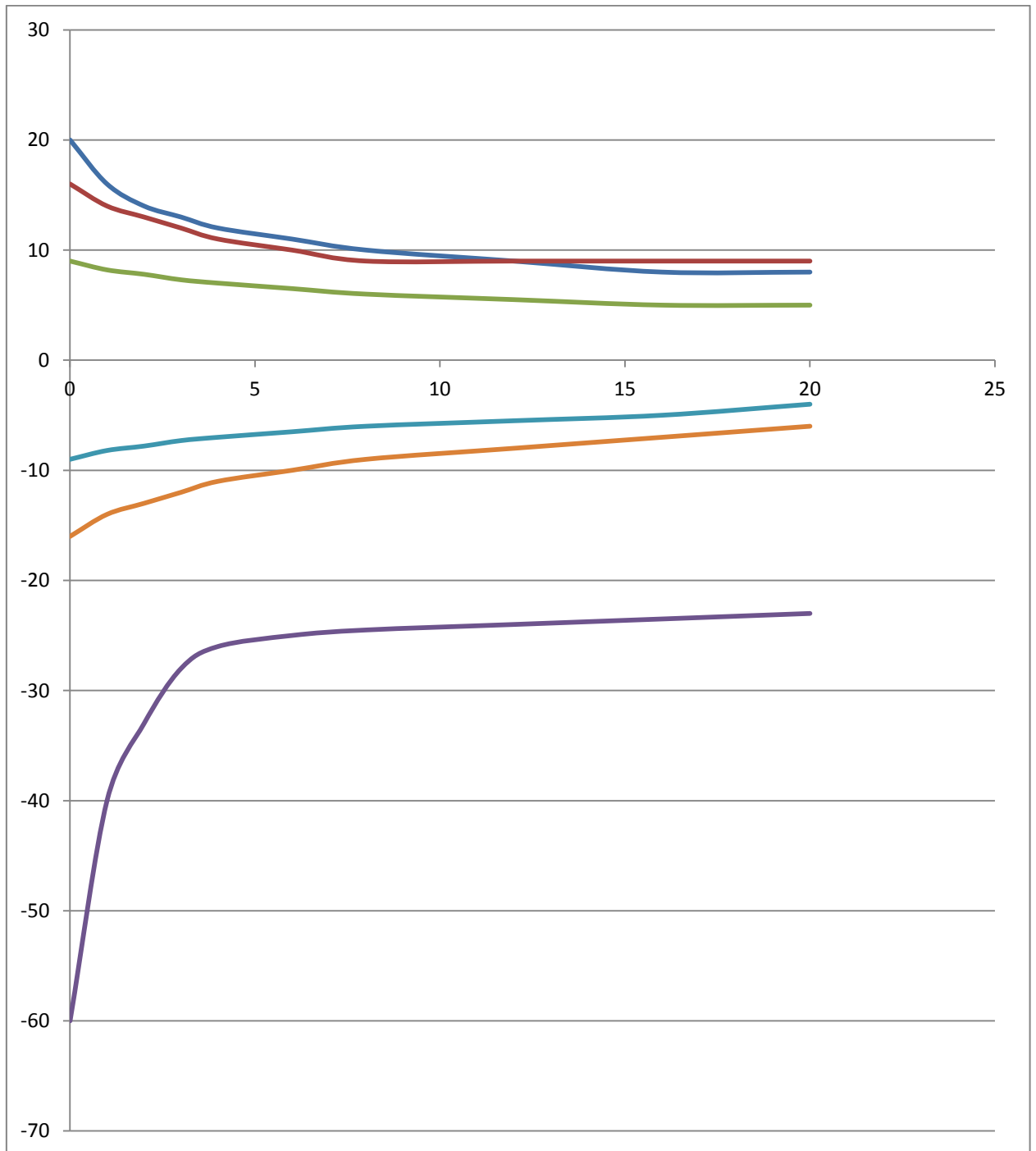


Рисунок (16) покращення проходження на складному рельєфі

Загальні висновки

За допомогою аналізу існуючих способів підвищення стійкості системи керування АПРА ми дійшли висновку, що на стійкість системи керування АПРА значний вплив вчиняє вибір структури АПРА, вибір потужності її рушіїв, покращення алгоритму керування з урахуванням виконання заданих задач та використане електронне обладнання. Додаткове покращення можливо отримати використовуючи принцип надлишковості. Розглянувши загальну модель рушійного комплексу та проаналізувавши структури та класифікацію АПРА, які можуть забезпечити одночасне керування по шести ступеням свободи підводного апарата з метою удосконалення системи керування АПРА була проведена розробка структури та алгоритмів керування АПРА та виконане моделювання процесу функціонування удосконаленої за допомогою електронного обладнання системи керування АПРА, а також розроблені рекомендації щодо покращення схеми системи керування. Аналіз та моделювання довели, що для підвищення керованості необхідно обрати форму АПРА з меншими приєднаними масами й коефіцієнтами опору при великих кутах атаки. Цього можна досягти за допомогою сплющеної вертикальної площини

За результатами проведених досліджень можемо зробити висновок, що при роботі АПРА на складному рельєфі та маневруванні у вертикальній площині можливість включення додаткових задач, визначається гнучкістю системи управління ПРТП, яку забезпечують алгоритми руху. Використання покращеної схеми системи керування призведе до значного підвищення швидкодії (17.4 %) , підвищення точності (5.8%) та стійкості системи управління ПРТП на (12.3%).

Впровадження вдосконаленої системи керування вирішить проблеми подальшого розвитку систем керування АПРА, дозволить функціонування в режимі реального часу, в непередбачених умовах, або в умовах невизначеності.